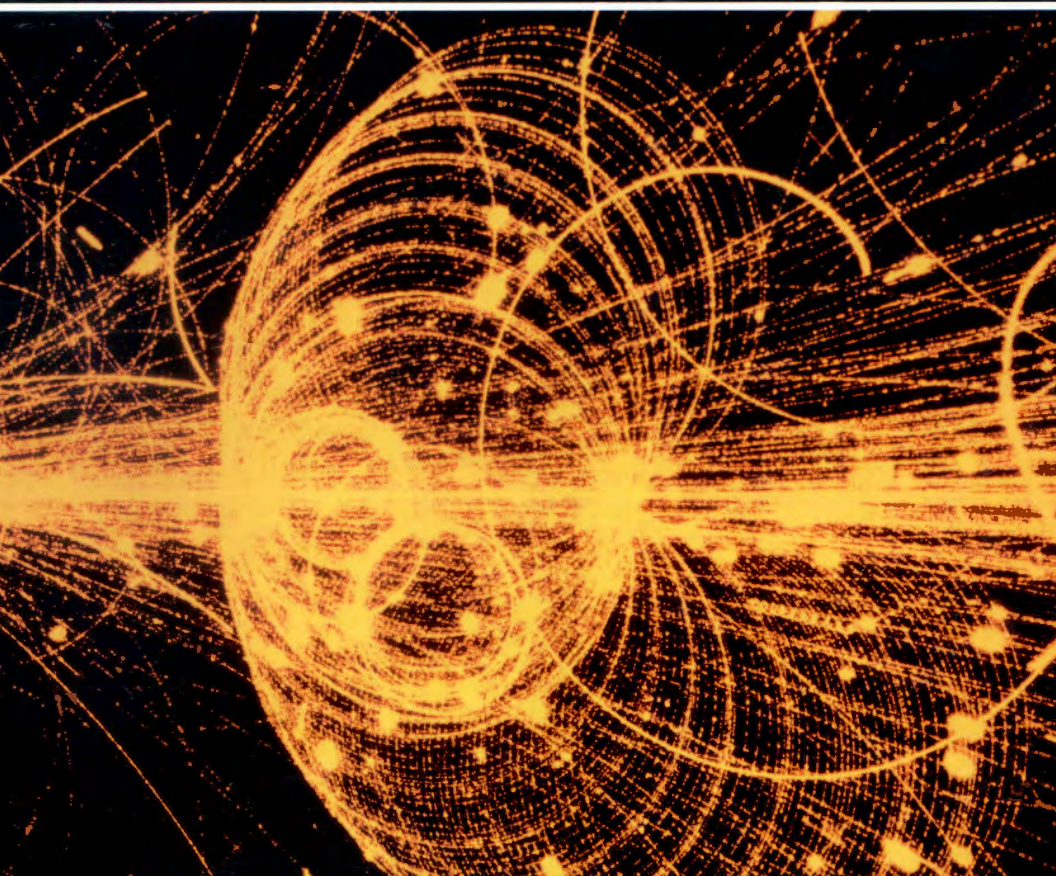
NATIONAL GEOGRAPHIC 7

LA ANTIMATERIA

En busca del reflejo oculto de la materia



En los inicios del cosmos, la antimateria se encontraba en la misma cantidad que la materia, pero en la actualidad prácticamente ha desaparecido en el universo. Aunque crearla y almacenarla para estudiarla resulta extraordinariamente difícil, la fascinación de los científicos por esta misteriosa sustancia sigue impulsando su investigación en campos diversos, como la medicina o la física. La aniquilación de sus antipartículas en contacto con las partículas de la materia genera un poder de radiación tan potente que abre increíbles posibilidades para uso energético. Pero, más allá de sus posibles aplicaciones industriales, su comprensión podría cambiar nuestras ideas sobre las propiedades del espacio y el tiempo.

Núria Pairó es física, escritora y divulgadora científica.

LA ANTIMATERIA

En busca del reflejo oculto
de la materia

Dirección científica: Manuel Lozano Leyva

© Núria Pairó por el texto
© 2017, RBA Coleccionables, S.A.U.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

© Ilustraciones: Francisco Javier Guarga Aragón

Fotografías: Age Fotostock: 67b; iStockPhoto: 41; Shutterstock: 97; Wikimedia Commons: 37, 53ai, 53ad, 53b, 67ai, 67ad, 71, 75, 133.

ISBN (OC): 978-84-473-9071-7
ISBN: 978-84-473-9077-9
Depósito legal: B.23660-2017

Impreso en Liberdúplex

Impreso en España - *Printed in Spain*

Para México

Edita

RBA Editores México, S. de R.L. de C.V. Av. Patriotismo 229, piso 8, Col. San Pedro de los Pinos, CP 03800, Deleg. Benito Juárez, Ciudad de México, México

Fecha primera publicación en México: junio 2018.

Editada, publicada e importada por RBA Editores México, S. de R.L. de C.V. Av. Patriotismo 229, piso 8, Col. San Pedro de los Pinos, CP 03800, Deleg. Benito Juárez, Ciudad de México, México

Impresa en Liberdúplex, Crta. BV-2249, Km. 7.4, Pol. Ind. Torrentfondo 08791 Sant Llorenç d'Hortons, Barcelona

ISBN: 978-607-9495-24-4 (Obra completa)
ISBN: 978-607-9495-29-9 (Libro)

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

SUMARIO

Introducción 7

01 **Desentrañar la antimateria** 13

02 **Dividir lo indivisible** 45

03 **¿Dónde está la antimateria?** 77

04 **¿Para qué sirve la antimateria?** 107

Lecturas recomendadas 137

Índice 139

INTRODUCCIÓN

La historia del progreso de la humanidad puede ser contada como la historia del dominio creciente de los materiales y de las fuentes de energía. Los materiales de las herramientas primitivas recuperadas por la arqueología han dado nombre a períodos como la Edad de Piedra, del Bronce o del Hierro, los inicios de una progresión que llega hasta los plásticos y los nuevos materiales, que incorporan, por ejemplo, capacidades de las tecnologías de la información.

También las fuentes de energía tienen sus hitos históricos, que empezaron con el dominio del fuego por parte de la humanidad primitiva. El aprovechamiento de la energía del viento y de los cursos de agua, por ejemplo en molinos, fue luego sustituido por el consumo de carbón y de petróleo, combustibles fósiles que posibilitaron las revoluciones industriales contemporáneas. El dominio de la energía nuclear y la aplicación de tecnología avanzada en el campo de las renovables son los últimos pasos consolidados en este proceso.

Desde esta perspectiva, la antimateria está llamada a marcar el siguiente salto adelante de la humanidad. La física del siglo XX descubrió la existencia de otra versión de la materia común que

constituye todo lo que conocemos: cada partícula tiene un análogo en el mundo de la antimateria, es decir, una antipartícula. Ambas comparten algunas características, como el tamaño o la masa, pero otras son completamente opuestas, como la carga eléctrica.

Estas diferencias podrían pasar totalmente inadvertidas y permitir que materia y antimateria convivieran sin ninguna dificultad, de no ser porque cuando ambas se encuentran, se aniquilan mutuamente liberando una gran cantidad de energía, tan enorme que bastaría con unos pocos gramos para abastecer el consumo energético de todo el planeta durante un día. Este fenómeno convierte a la antimateria en una sustancia muy especial y, sin ninguna duda, en la fuente de energía más efectiva que puede existir, pero también hace que sea una sustancia muy escasa en la naturaleza.

A pesar de su potencial, la inmediata aniquilación de una antipartícula al entrar en contacto con su partícula dificulta enormemente el estudio, almacenaje y utilización de la antimateria, y la convierte en una sustancia potencialmente muy peligrosa. Aunque ya se utiliza para obtener imágenes médicas, aún hay muchos retos para su completo dominio: hay que conocer con el máximo detalle sus características físicas y desarrollar técnicas de producción y almacenamiento que garanticen niveles de seguridad muy superiores a los de cualquier otra tecnología. Una vez superados estos retos, tendremos acceso a todo un mundo de utilidades por explorar.

Debido a la pequeña cantidad de antimateria existente en el universo no fue fácil descubrir su existencia. El primero en deducirla fue Paul Dirac, en 1929, cuando intentaba encontrar una ecuación que describiera el comportamiento tanto cuántico como relativista del electrón. Una vez formuló esta ecuación, descubrió que también se aplicaba a una partícula idéntica pero con carga eléctrica positiva. Era la primera vez que se predecía la existencia de una partícula antes de ser detectada experimentalmente: en 1932 Carl David Anderson detectó el primer antielectrón —que ahora se conoce como positrón— en rayos cósmicos provenientes del espacio exterior.

La ecuación de Dirac también era aplicable a otras partículas subatómicas como, por ejemplo, el protón, lo que implicaba que debía existir el antiprotón, que no se llegó a detectar hasta 1955, cuando se pudo crear de forma artificial en un acelerador de partículas.

Según las leyes de conservación de la física, cada partícula tenía que crearse juntamente con su antipartícula: por tanto, en el universo debería haber exactamente la misma cantidad de materia que de antimateria. Sin embargo, es fácil deducir que la cantidad de antimateria a nuestro alrededor es insignificante, pues en caso contrario observaríamos con frecuencia las potentes emisiones energéticas de las aniquilaciones materia-antimateria.

Toda la materia del universo se creó a partir de la energía del Big Bang. Así que, según las leyes de la física conocida, en aquel momento se debería haber creado exactamente la misma cantidad de antimateria que de materia. De ser así, lo lógico hubiera sido que ambas sustancias se hubieran aniquilado mutuamente, dejando un universo lleno de energía y nada más, pero no fue así, como lo demuestra la existencia actual del universo. Para explicar este exceso de materia solo sería necesario que se hubiera creado o mantenido una partícula más por cada 1000 millones de antipartículas. La cuestión entonces recae en resolver en qué momento la materia se impuso a la antimateria: ¿se violaron las leyes de la física desde un principio imponiendo esta diferencia? ¿O fue más adelante que las diferencias entre ambas sustancias provocaron esa desigualdad? A pesar de que existen varias teorías que permitirían dar respuesta a estas preguntas, los físicos de partículas siguen en busca de más datos experimentales que las confirmen o desmientan.

Algunos científicos han planteado otra opción a la que pocos han dado credibilidad: que, justo después de la creación de la materia y antimateria, estas se separaran formando galaxias enteras de antimateria. Sin embargo, existen argumentos científicos para impedir la viabilidad de un mundo en el que ambas formas convivieran.

Según la física actual, la naturaleza se rige por cuatro fuerzas fundamentales: la gravitatoria, la electromagnética, la nuclear fuerte y la nuclear débil. Durante el siglo XX los físicos empezaron a desarrollar un modelo teórico, conocido como el modelo estándar, para explicar la diversidad de partículas subatómicas existentes y las fuerzas que se ejercen entre ellas. El desarrollo del modelo ha consistido en una carrera constante entre físicos teóricos y aplicados; por una parte, consiguiendo explicar los nuevos e inesperados resultados que se obtenían de los experimentos y, por otra, detectando partículas que habían sido predichas con anterioridad de forma teórica.

El modelo estándar ha sido capaz de describir de forma correcta tres de las cuatro fuerzas fundamentales, pero todavía le falta ser capaz de explicar la gravedad. Para poder incluir esta fuerza dentro del modelo, es indispensable detectar de forma experimental un gravitón, una partícula que se ha predicho de forma teórica y de la que se cree que es la portadora de la fuerza de gravedad. A finales del siglo XX aparecieron nuevas teorías físicas, como la teoría de cuerdas, capaces de explicar fenómenos más allá del modelo estándar. Dentro de este marco se concibe alguna teoría que pueda explicar la ruptura de simetría entre la materia y la antimateria en los primeros instantes del universo.

En los laboratorios de partículas se están llevando a cabo escrupulosos estudios para conseguir encontrar fenómenos que expliquen o verifiquen las teorías existentes. El CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear) es el centro de investigación sobre física de partículas más grande e importante del mundo y en él se realizan varios experimentos simultáneamente, muchos de ellos destinados a descubrir los secretos que esconde la antimateria. Para ello es necesario no solo crear las partículas y antipartículas deseadas, sino que estas se deben poder dominar y almacenar suficiente tiempo. Solo mejorando estas técnicas será posible algún día estudiar y detectar las propiedades que diferencian la

antimateria de la materia y que nos ayudarán a entender nuestro origen y el del universo.

Una vez se consiga entender y dominar la antimateria, será necesario encontrar la mejor forma de utilizarla en las aplicaciones que durante tantos años se han soñado. Es el estudio de las propiedades de su aniquilación con la materia lo que permitirá que sea usada en las terapias contra el cáncer u otras enfermedades, o lo que la convertirá en una fuente de energía para los cohetes, que permitirá viajar a la Luna en cuestión de horas y a Marte en cuestión de días. Incluso se especula que un viaje fuera del sistema solar duraría pocos años, de forma que la antimateria nos podría abrir la puerta a todo un mundo desconocido, el espacio exterior. Solo cuando seamos totalmente capaces de controlar la antimateria a la perfección se podrá crear, transportar y usar para convertir el mundo actual en un mundo inimaginable.

01

DESENTRAÑAR LA ANTIMATERIA

En 1929, Paul Dirac determinó de forma teórica la existencia de la antimateria. Desde entonces, científicos de todo el mundo se dedican a estudiar sus propiedades intrínsecas y sus posibles aplicaciones tecnológicas, que podrían guiar a la humanidad hacia un futuro propio de la más increíble historia de ciencia ficción.

Desde el descubrimiento de la antimateria en la primera mitad del siglo XX, se ha convertido para muchos escritores de ciencia ficción en un motivo recurrente y en una poderosa fuente de inspiración: aprovechando la novedad y la ignorancia de las propiedades de este nuevo tipo de materia, los escritores permitieron que su imaginación volara más allá de los límites del conocimiento y describieron un posible futuro en el que la antimateria formaba parte del día a día.

La antimateria puede parecer una fantasía extraída del otro lado del espejo y, sin embargo, es real. Es muy parecida a la materia común que nos rodea, pero en lugar de estar formada por partículas, átomos y elementos, está formada por antipartículas, antiátomos y antielementos. Cada partícula de materia tiene una antipartícula correspondiente en la antimateria, casi idéntica pero con al menos una propiedad física con un valor de signo opuesto, de manera que cuando una partícula y su antipartícula interaccionan, se aniquilan mutuamente con una enorme emisión de energía. Por ello es difícil encontrar, producir o almacenar antimateria, aunque sus

propiedades la conviertan en una sustancia potencialmente destinada a cambiar el curso de toda nuestra tecnología.

Isaac Asimov, el célebre escritor de ciencia ficción, concibió en los relatos y novelas de su *Serie de los robots*, iniciada en 1940, la construcción de un cerebro artificial para los androides que les dotaba de cierta consciencia, parecida a la humana. Este cerebro consistía en una malla de platino o iridio en cuyo interior las comunicaciones se realizaban mediante flujos de positrones, un tipo de partículas con la misma masa que el electrón pero con carga eléctrica opuesta. Asimov se inventó esta nueva manera de dotar con inteligencia a los androides en obras como *Yo, robot* (1950) o *El hombre bicentenario* (1976), con lo que fue el primer autor en hacer llegar al gran público el nombre de una partícula de antimateria.

En 1966 la antimateria dio el salto a la pantalla en la famosa serie televisiva *Star Trek*, en la que se usaba como fuente de energía, aprovechando la ingente cantidad que se desprende en una hipotética reacción materia-antimateria, bajo control en los motores de la nave *Enterprise*. En la segunda serie de la franquicia, *Star Trek: la nueva generación*, que se empezó a emitir en 1987, uno de los personajes principales era el comandante Data, un robot con cerebro positrónico, que recoge el testigo de los robots ideados por Asimov.

Décadas más tarde, aprovechando los avances científicos que se habían realizado en este campo, Dan Brown convirtió la antimateria en el arma más mortífera de la humanidad en su novela *Ángeles y Demonios* (2000). En esta obra, el protagonista, Robert Langdon, tiene que encontrar una bomba formada por tan solo un cuarto de gramo de antimateria, que sería capaz de destruir el Vaticano entero mediante la gran explosión que causaría su contacto con materia ordinaria.

Es evidente que no son los escritores quienes marcan los límites de lo posible, sino las leyes de la naturaleza, y muchas de estas aplicaciones aún están muy alejadas de la realidad. Aunque es imposible saber si la antimateria nos permitirá algún día dotar de

consciencia a los robots o viajar entre las estrellas, sin embargo, la rapidez con la que aumenta el conocimiento de la física de partículas parece indicar que con la antimateria, en un futuro no muy lejano, la realidad superará una vez más a la ficción.

MATERIA Y ANTIMATERIA, GEMELAS Y OPUESTAS

Si se consideran las avanzadas aplicaciones de la antimateria descritas en las obras de ciencia ficción, es fácil asociarla con un elemento de gran complejidad, tanto que se puede creer que solo pertenece al mundo de lo imaginario. Sin embargo, basta con adentrarse un poco en la ciencia que la describe para descubrir que es tan simple entender la antimateria como la materia común.

Se entiende por materia común aquella que nos rodea y de la que está formado el universo: la podemos percibir con los sentidos, tiene masa y ocupa un lugar en el espacio. La antimateria, por su lado, comparte la mayoría de propiedades y características de la materia común. De hecho, si la materia y la antimateria no interactuaran nunca, sería imposible distinguir entre una y otra: por este motivo, se puede afirmar que la antimateria es la gemela de la materia. Así pues, para poder profundizar en el concepto de antimateria es necesario entender primero las características de la materia común.

¿Cómo se forma todo lo que conocemos?

Desde un punto de vista clásico, el concepto de materia engloba todo lo que tenga masa, ocupe un espacio y perdure en el tiempo. Esto incluye desde las partículas subatómicas –de tamaño más pequeño que el átomo– hasta los cuerpos celestes más grandes del universo. Las partículas subatómicas se unen en diferentes configuraciones para poder formar átomos, elementos, moléculas o

cuerpos, de la misma manera que las letras del abecedario se juntan para construir sílabas, palabras, frases y libros.

Es imposible predecir los límites del conocimiento científico.

MENDELÉYEV

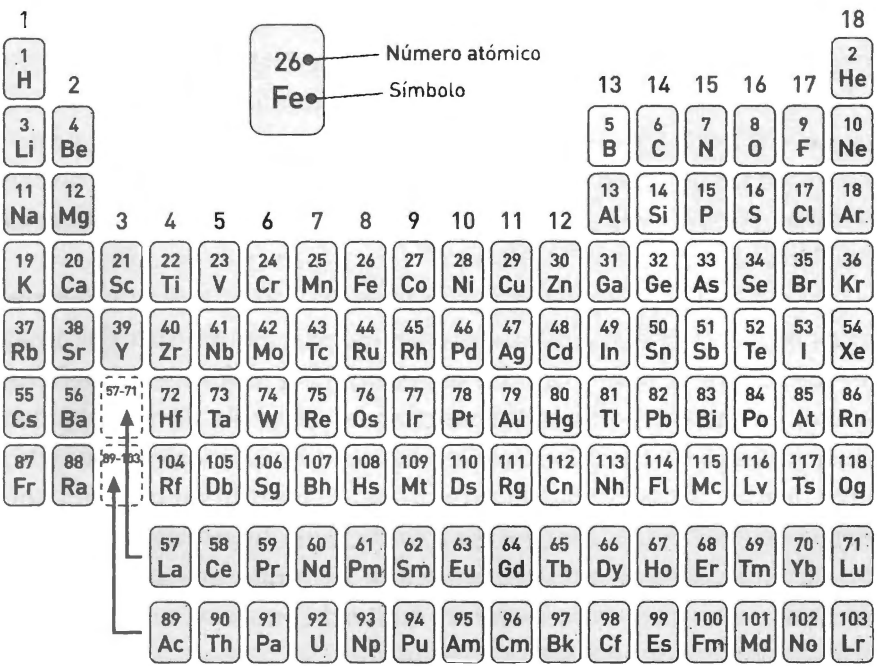
El registro de las partículas subatómicas detectadas aumenta con frecuencia gracias a los descubrimientos realizados en los centros de investigación. Las partículas se identifican y diferencian porque cada una tiene unas características físicas concretas (masa, carga eléctrica y momento magnético, entre otras) que las dotan de unas propiedades únicas. Las más conocidas, ya que constituyen los átomos, son el protón, el neutrón y el electrón.

La palabra *átomo* viene del término griego «atomón» que significa «sin división». Este fue el nombre que el filósofo griego Demócrito, utilizó para definir a la unidad más pequeña de la materia, es decir, una unidad indivisible. A pesar de que actualmente no hay duda alguna de que los átomos son divisibles en partículas aún menores, el antiguo concepto de unidad mínima no está del todo equivocado, ya que el átomo sigue siendo la unidad más pequeña de materia con las propiedades de un elemento químico: mientras que todos los protones, electrones o neutrones son completamente iguales entre los de su mismo tipo, los átomos cambian sus propiedades químicas según su configuración interna, dando lugar a los 118 elementos químicos conocidos, 94 de los cuales se encuentran en la naturaleza, mientras que los 24 restantes han sido sintetizados artificialmente.

La identidad de cada átomo se determina a partir del número de protones que contiene: es lo que conocemos como el número atómico (número Z). Un átomo de oxígeno, por ejemplo, tiene ocho protones; en el caso de que perdiera uno, dejaría de ser un átomo de oxígeno (Z = 8) para convertirse en un átomo de nitrógeno (Z = 7). La forma más aceptada para ordenar los elementos es la tabla periódica, cuya primera versión fue publicada en 1869 por el químico ruso Dmitri Ivánovich Mendeléyev.

> LA TABLA PERIÓDICA

La tabla periódica es una disposición de los elementos químicos ordenados según su número atómico (número de protones) y sus propiedades químicas. Se organiza en filas llamadas *períodos* y columnas denominadas *grupos*. Fue ideada por el químico ruso Mendeléyev, quien, además de incluir los elementos conocidos en su época, se atrevió a pronosticar la existencia y las propiedades de otros que aún no habían sido descubiertos, reservándoles espacios en la tabla, a la espera de su identificación experimental. La mayoría de las predicciones de Mendeléyev resultaron acertadas, demostrando el valor predictivo de la tabla. La versión más difundida de la tabla periódica fue diseñada por el químico suizo Alfred Werner y tiene en cuenta todos los elementos conocidos, incluyendo algunos obtenidos mediante síntesis artificial, que no se encuentran en la naturaleza.



Los protones se encuentran en el núcleo del átomo junto con los neutrones, ligados entre ellos con gran intensidad gracias a una de las interacciones fundamentales de la naturaleza, la llamada *fuerza nuclear fuerte*. En el núcleo se concentra la mayor parte de la masa del átomo: la masa de un protón es de $1{,}6726 \times 10^{-27}$ kg y la del neutrón es ligeramente mayor, $1{,}6749 \times 10^{-27}$ kg. En comparación, la masa de los electrones es insignificante, $9{,}1094 \times 10^{-31}$ kg, más de 1 800 veces menor que la del protón. En el recuento de la distribución de la masa de un átomo cualquiera, casi el 100% de ella se concentra en el núcleo.

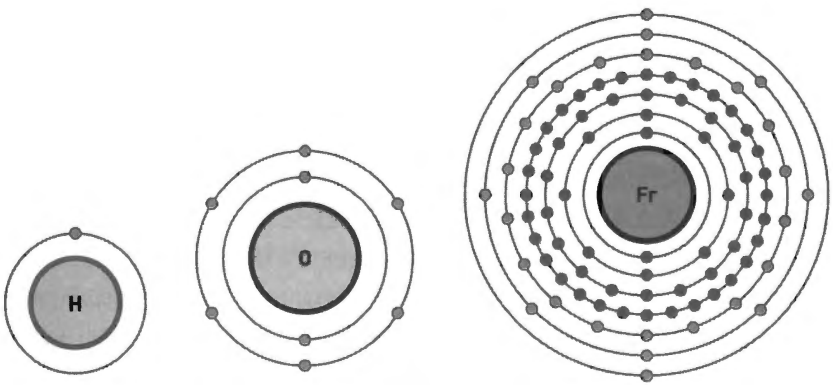
Los electrones, a pesar de aportar un porción ínfima de la masa del átomo, son los causantes de casi todo su volumen. Orbitan alrededor del núcleo a una distancia del orden de 10^{-10} m, dejando solo el vacío entre ellos y el núcleo. Para entender los tamaños atómicos, podemos recurrir a algunas comparaciones: si un átomo fuera del tamaño de un campo de fútbol, el núcleo sería como un guisante colocado en su centro, y el tamaño de un protón comparado con el de la Tierra es similar al de nuestro planeta respecto a la Vía Láctea al completo. En conclusión, mientras casi toda la masa de un objeto se debe a los nucleones (es decir, a las partículas de núcleo, protones y neutrones) de los átomos que lo forman, su volumen se debe a sus electrones o, más precisamente, a su disposición alrededor del núcleo atómico.

Los electrones no pueden orbitar en cualquier región del espacio. De hecho, es justo lo contrario: solo tienen permitidas unas pocas regiones, conocidas como orbitales atómicos. Cada orbital puede estar ocupado por un número limitado de electrones, con una cantidad de energía concreta, menor cuanto más cerca del núcleo se encuentra. Según el principio de la mínima energía, cualquier sistema físico tiende a estabilizarse en un estado de mínima energía, de manera que los electrones tienden a rellenar primero el orbital más cercano al núcleo, después el segundo, el tercero... y así sucesivamente, hasta que todos los electrones quedan distri-

buidos. Podemos imaginar el núcleo como un escenario de un anfiteatro, los orbitales como los asientos de las gradas que lo rodean y el público como los electrones. Según este símil, cada persona del público querría estar lo más cerca posible del escenario, para necesitar los mínimos esfuerzos para ver o escuchar mejor.

Cuando al menos uno de los electrones del átomo se encuentra en un nivel de energía más elevado que el mínimo permitido, se dice que el átomo está excitado. Por el contrario, si todos los electrones están en el nivel de energía mínimo permitido para cada uno, se considera que el átomo permanece en su estado fundamental. En la figura 1 se muestra un esquema en el que aparece la configuración de los electrones de un átomo de hidrógeno, uno de oxígeno y uno de francio, con 1, 8 y 87 electrones, respectivamente, en sus estados fundamentales. Hay que señalar que al ser un esquema no muestra la forma real de los orbitales, que no son circulares, sino de formas diferentes y mucho más complejas.

Fig. 1



En la representación de los átomos de hidrogeno, oxígeno y francio se observa que el número de electrones de cada orbital no es constante. Los últimos niveles no están llenos, es decir, aún cabrían más electrones.

Los átomos en su estado fundamental son neutros, es decir, no tienen carga eléctrica. Sin embargo, de las partículas que los forman las únicas que son neutras son los neutrones, mientras que los electrones tienen carga negativa y los protones, positiva. Los signos de las cargas no corresponden a una propiedad negativa o positiva, son solo un convenio para expresar que son opuestas.

> Nada es demasiado maravilloso para ser verdad si es coherente con las leyes de la naturaleza.
>
> MICHAEL FARADAY

Los orbitales atómicos no son la trayectoria exacta por donde pasa un electrón, sino la región del espacio en la que es más probable que se encuentren: las leyes de la mecánica cuántica implican que es imposible conocer con exactitud su posición en todo momento. En 1831, el físico británico Michael Faraday descubrió el fenómeno de inducción electromagnética, que consiste en que una carga eléctrica en movimiento crea un campo magnético: como los electrones se encuentran en constante movimiento y están cargados eléctricamente, crean un campo magnético, que provee al electrón de una propiedad llamada *momento magnético*, por la que interactúa con otras partículas o campos dotados de magnetismo.

La interacción entre átomos produce un intercambio de electrones constante entre ellos, ganándolos o cediéndolos según su estructura. Al ceder electrones, los átomos neutros se convierten en cationes, cargados positivamente ya que tienen más protones en el núcleo que electrones en los orbitales. Por el contrario, cuando capturan electrones se convierten en aniones, átomos cargados negativamente. Los átomos se enlazan con otros átomos del mismo o de distinto elemento gracias a esta tendencia a ceder o capturar electrones, formando moléculas, compuestos, cristales y otras estructuras con las que se crea la materia que conocemos. Solo hay un grupo de elementos, los llamados gases nobles, tan estables químicamente que por norma general no interaccionan con otros

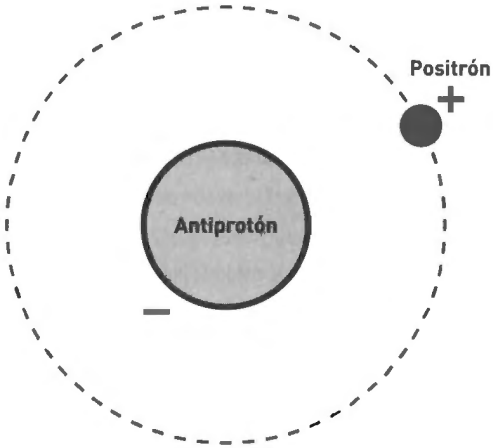
átomos, ni siquiera entre ellos mismos. En resumen, las partículas que forman la materia común tienen como propiedades fundamentales una masa, una carga eléctrica y un momento magnético determinados, y se combinan para crear formas más complejas de materia gracias a las interacciones que se establecen entre ellas.

Antimateria: el otro lado del espejo

A cada partícula de materia se le puede asociar una antipartícula con las mismas propiedades fundamentales, pero al menos una de ellas opuesta en signo. Esta situación se puede comparar con la de dos gemelos idénticos, uno de los cuales fuera diestro y el otro zurdo: sería imposible distinguirlos a simple vista, pero la dominancia de lados diferentes entre ellos sería suficiente para hacerlos interactuar con el entorno de forma distinta. Por lo general, se definen las antipartículas respecto a las partículas diciendo que son idénticas pero con la carga eléctrica opuesta. Sin embargo, esta definición es algo inexacta, ya que incluso las partículas neutras, como el neutrón, tienen antipartículas. De hecho, la única partícula que no tiene una antipartícula correspondiente es el fotón, por lo que se considera que ella misma es su propia antipartícula.

La interacción entre antipartículas es exactamente igual que la interacción entre partículas ordinarias. Así, partiendo de las antipartículas elementales, se pueden formar antiátomos, antielementos, antimoléculas e incluso se podrían llegar a formar antimundos o antiuniversos. Para formar, por ejemplo, un antiátomo serían necesarias las antipartículas de los protones, neutrones y electrones. Igual que el átomo de configuración más sencilla es el de hidrógeno, el antiátomo más simple es el antihidrógeno, representado en la figura 2, formado por un antiprotón y un positrón.

Los antiprotones son exactamente igual que los protones excepto que su carga eléctrica es negativa en vez de positiva, aunque



Un antiátomo de antihidrógeno tiene un núcleo formado por un antiprotón, con un positrón orbitando a su alrededor.

mantiene el mismo valor ($1{,}6 \times 10^{-19}$ C). Las antipartículas de los electrones son los positrones (es la única antipartícula que tiene un nombre propio, no formado con el prefijo anti), exactamente iguales a los electrones pero con carga eléctrica positiva en lugar de negativa. Finalmente, el antineutrón tiene la misma masa que el neutrón y, como este, carece de carga eléctrica, pero las direcciones de sus momentos magnéticos son opuestas.

El nombre de antimateria puede ser un poco engañoso, ya que fomenta la idea de que todas sus propiedades son opuestas a las de la materia. De hecho, hay científicos que prefieren llamarla con otros nombres, por ejemplo *materia-espejo*, que es como la definen Robert L. Forward y Joel Davis en su libro *Explorando el mundo de la antimateria*. También se han propuesto *comateria*, *contramateria* y *obmateria*, pero ninguno de estos nombres ha calado entre la comunidad científica, que sigue denominándola mayoritariamente *antimateria*.

Un encuentro más que explosivo

Existe un fenómeno que por sí solo justificaría la denominación antimateria: el de la aniqulación de los pares partícula-antipartícula. Cuando una antipartícula se encuentra con su partícula correspondiente, se aniquilan mutuamente, dejando como único rastro de su existencia una descomunal emisión de energía. La aniquilación de la materia con la antimateria solo ocurre cuando hay interacción de las partículas con sus antipartículas correspondientes, es decir, los electrones se aniquilan con positrones, pero no con antiprotones. Lo mismo sucede con los protones, que solo se aniquilan con antiprotones y los neutrones con antineutrones.

Se considera que este fenómeno es el causante de que no se encuentre con facilidad antimateria en el universo y aún menos en la Tierra, y que la poca que hay tenga una vida extremadamente corta. Un positrón es capaz de moverse por el vacío del espacio profundo de forma indefinida, pero basta el contacto con un solo electrón para que ambos desaparezcan.

La aniquilación entre la materia y la antimateria produce una cantidad de energía cuyo valor depende de la masa que se ha aniquilado, tal y como contempla la fórmula más famosa de la historia de la ciencia: $E = mc^2$. Esta ecuación fue determinada por Albert Einstein, e indica que la máxima cantidad de energía (E) que se puede obtener de un cuerpo en reposo es igual a su masa (m) por la velocidad de la luz en el vacío (c) al cuadrado. Como la velocidad de la luz en el vacío es muy alta, 299 792 458 m/s, con la aniquilación de muy poca masa se obtendrían cantidades de energía muy elevadas.

Detrás de una fórmula matemática tan sencilla se esconde uno de los principios físicos de mayor relavancia: lo que realmente expresa es que la energía y la masa ni se crean ni se destruyen, sino que se transforman la una en la otra, es decir, que son una misma magnitud expresada en la naturaleza de dos formas diferentes. De hecho, tomando $c = 1$ para la velocidad de la luz, la masa de las

partículas subatómicas a menudo se expresa en electrovoltios (eV), una unidad de energía: la masa del electrón, por ejemplo, es de 0,511 MeV.

La ecuación de Einstein se deduce de los principios básicos de la teoría de la relatividad especial, cuyas leyes a la escala de la mayoría de fenómenos con los que tratan los seres humanos se pueden simplificar y sustituir por las de la mecánica newtoniana, de manera que la energía de los cuerpos se calcula con expresiones que dependen del tipo de fenómeno estudiado: por ejemplo, la energía cinética de un cuerpo en movimiento viene determinada por la fórmula $E = \frac{1}{2}mv^2$, donde v es la velocidad a la que se desplaza. Para valorar la diferencia de niveles de energía que se manejan en uno u otro caso, se puede considerar este ejemplo: si dos automóviles de unos 1 000 kg chocan de frente a una velocidad de 100 km/h, la energía cinética del impacto provocará importantes daños en ambos vehículos. En cambio, si uno de los coches estuviera hecho de materia y el otro de antimateria, con el simple contacto entre sus masas la aniquilación materia-antimateria daría lugar a una explosión de energía suficiente para causar daños a escala planetaria.

La aniquilación entre materia y antimateria permite que prácticamente el 100% de la masa involucrada se transforme en energía, un valor al que no se aproxima ni lo más mínimo ninguna otra fuente de energía conocida. De hecho, las bombas de hidrógeno, las más potentes jamás desarrolladas, son capaces de convertir solo un 1% de su masa en energía. Este rendimiento perfecto asegura que con muy poca masa se pueda obtener mucha energía: bastaría un solo gramo de materia y antimateria para producir la misma energía que una de las bombas nucleares que se lanzaron sobre Hiroshima y Nagasaki a finales de la Segunda Guerra Mundial.

Para tener una idea más clara de las cantidades de energía que se pueden conseguir con la aniquilación materia-antimateria, en la tabla de la página siguiente se muestra la relación entre la ener-

gía implicada en algunos fenómenos que ocurren constantemente a nuestro alrededor con la masa y la cantidad de antiprotones que proporcionaría una cantidad de energía equivalente.

Como se puede observar, con cantidades muy pequeñas de antimateria se pueden obtener grandes cantidades de energía. La masa de un coche, por ejemplo, sería suficiente para proporcionar energía a todo el planeta durante un año entero, y con unos pocos miligramos (el peso de la milésima parte de una hoja de papel) se podría poner en órbita alrededor de la Tierra una carga de unas pocas toneladas.

La aniquilación materia-antimateria es el ejemplo perfecto y más ilustrativo de la ecuación definida por Einstein, que cambió el transcurso de la física moderna. Pero ¿cómo y por qué se pasa de tener masa a energía o viceversa? Para entender el fenómeno es importante recordar que, según la ley de la conservación de la energía, esta no se puede crear ni destruir, de modo que cuando una partícula se aniquila con su antipartícula, ambas se transforman en partículas y antipartículas con menos masa y, por tanto, con más energía. Cada tipo de aniquilación es diferente, de manera que las partículas y la cantidad de energía resultantes de la reacción dependen de las condiciones y de las partículas iniciales.

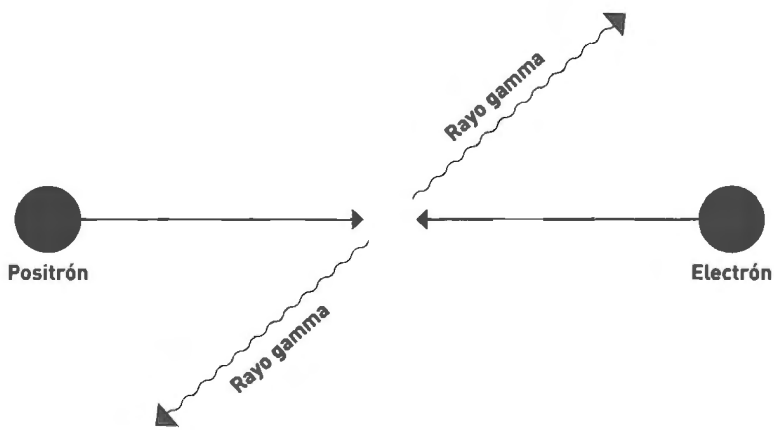
Fenómeno	***Energía* (J)**	***Masa antiprotones* (kg)**	***Número de antiprotones***
Energía media de un glóbulo rojo del cuerpo humano	3×10^{-15}	$1{,}7 \times 10^{-32}$	10^{-5}
Energía aproximada de un billete cayendo desde 1 m	0,1	$5{,}6 \times 10^{-19}$	$3{,}3 \times 10^{8}$
Consumo de una bombilla de 100 W durante 1 s	100	$5{,}6 \times 10^{-16}$	$3{,}3 \times 10^{11}$
Aporte energético aproximado de una manzana	600 000	$3{,}3 \times 10^{-12}$	2×10^{15}
Consumo energético mundial durante 2010	5×10^{20}	2 777	$1{,}7 \times 10^{30}$

Por ejemplo, la aniquilación más sencilla es la que ocurre entre un electrón y un positrón, que da como producto dos rayos gamma (γ), como se muestra en el esquema de la figura 3. Las partículas que forman los rayos gamma son fotones (por tanto, partículas sin masa) de muy alta frecuencia, dotados de toda la energía en la que se ha convertido la masa del par electrón-positrón. Esta reacción se expresa de la siguiente manera:

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

Cuando la partícula y la antipartícula se encuentran en reposo, los fotones salen disparados en la misma dirección pero en sentidos opuestos, con una energía cada uno de 0,511 MeV, equivalente a la masa de un electrón o positrón en reposo. En caso de que las partículas se encuentren en movimiento, el resultado de la aniquilación también son dos fotones gamma, pero su dirección y energía dependen de las condiciones iniciales de la aniquilación.

Fig. 3



El producto de la aniquilación entre un positrón (e^+) y un electrón (e^-) es la emisión de energía, en forma de dos rayos gamma.

APROVECHAR EL MATERIAL MÁS PELIGROSO DEL UNIVERSO

El fenómeno de aniquilación entre materia y antimateria es de gran interés científico y es de esperar que el desarrollo de procedimientos para controlar estas interacciones conduzca en un futuro a la aparición de múltiples aplicaciones tecnológicas. Hoy día, los usos prácticos de la antimateria son muy escasos, pero su gran potencial para la generación de energía hace que sea previsible que su empleo sea una de las claves del futuro.

Para el público en general pueden resultar fascinantes las aplicaciones de la antimateria con las que los escritores de ciencia ficción han estimulado la imaginación del público: robots cuyo cerebro positrónico les posibilite ser conscientes o naves espaciales capaces de surcar el espacio entre las estrellas, como las de *Star Trek* y las de la saga *Star Wars*. Por ahora, los científicos e ingenieros se centran en aplicaciones posibles en un plazo de pocos años o décadas.

Las propiedades de la antimateria se están estudiando en los más importantes laboratorios de partículas del mundo, como el CERN (Suiza) o el Fermilab (Estados Unidos), cuyo máximo objetivo es descubrir los secretos más profundos del universo. Sin embargo, esto no significa que la antimateria no haya encontrado ya algunos usos prácticos: en medicina, se está usando para obtener imágenes del interior del cuerpo humano mediante el procedimiento conocido como PET (de las siglas en inglés de tomografía por emisión de positrones). También se está explorando cómo poder aprovechar sus propiedades para ser usada como fuente de energía: en teoría es el combustible perfecto, porque se necesita muy poca masa para obtener grandes cantidades de energía y no deja residuos materiales apreciables. Algunos estudios pioneros también han explorado su potencial en otros campos, como en ingeniería y metalurgia.

Usar solo en condiciones extremas

Una de las posibles aplicaciones de la antimateria puede parecer la más futurista y, sin embargo, puede que su realización esté solo a pocos años vista: es el uso de la antimateria como combustible para los viajes espaciales. A pesar del elevado coste económico actual para crear antimateria, usarla para este fin podría ser rentable. Para generar la gran cantidad de energía necesaria para elevar una nave más allá del campo gravitatorio terrestre, los cohetes actuales funcionan con combustibles químicos, de los que se necesita un gran volumen, que acaba constituyendo la mayor fracción de la masa total del ingenio. Si se aumenta la masa que se quiere poner en órbita, la cantidad de combustible crece con rapidez, de manera que pronto se llega a un límite tecnológico en el tamaño del cohete que se puede construir. Las pequeñas cantidades de antimateria necesarias para mandar una carga al espacio resolverían este problema, ya que serían despreciables comparadas con la masa del resto de la nave.

Un motor con un combustible de materia y antimateria convertiría el 100% de su masa en energía y no solo mejoraría los viajes espaciales en lo económico, sino también en comodidad y tiempo. Por tanto, ampliaría enormemente las distancias alcanzables, que podrían llegar, en teoría, a permitir salir del sistema solar. Imaginemos, por ejemplo, cómo sería un viaje espacial a un planeta que se encontrase a una distancia de la Tierra de cuarenta años luz ($3{,}78 \times 10^{14}$ km), es decir, que viajando a la velocidad de la luz se tardarían cuarenta años en llegar. En este caso, durante los primeros 4,93 años de viaje la nave impulsada por antimateria viajaría con una aceleración equivalente a la de la gravedad terrestre, 9,81 m/s^2, lo que permitiría a los astronautas moverse exactamente con la misma facilidad y comodidad que si estuvieran en la superficie de la Tierra. La nave llegaría a alcanzar una velocidad equivalente al 98% de la velocidad de la luz, y viajaría bajo estas condiciones durante otros 32,65 años, desplazándose solo por inercia, sin necesidad de propulsión. Finalmente, en

su aproximación al objetivo, la nave estaría otros 4,93 años desacelerando: el viaje total duraría 42,51 años. En comparación, moviéndose con la capacidad de impulsión de una nave de combustible químico como las actuales, un viaje a la estrella más cercana al sistema solar, Proxima Centauri, que se encuentra a 4,23 años luz (4×10^{13} km) duraría alrededor de 72 000 años.

Aunque la comparación entre el tiempo necesario para un hipotético viaje interestelar con una nave con combustible de antimateria y una con combustible químico sea muy claramente favorable a la primera, un viaje de más de cuarenta años puede parecer demasiado largo para los tripulantes. En este caso, las leyes de la teoría de la relatividad juegan a favor del viajero humano: cuando un cuerpo se mueve a velocidades relativistas, cercanas a la velocidad de la luz, el tiempo pasa de forma diferente a como lo hace para alguien que permanece estático. Así, el tiempo para los tripulantes de la nave pasaría más despacio que para los habitantes de la Tierra, de manera que, mientras que en la Tierra habrían pasado 42,5 años, para los astronautas en el interior de la nave solo habrían transcurrido 11,1 años. No son ni de lejos los lapsos de tiempo casi instantáneos que duran estos viajes en el cine, pero se acercan cada vez más al ámbito de lo tecnológicamente posible.

Así, el combustible de antimateria mejoraría enormemente los viajes espaciales, pero ¿podría aplicarse también para medios de transporte en desplazamientos más cercanos? En teoría, si se usara combustible de antimateria para vehículos terrestres o aviones, se podría viajar a velocidades más elevadas y se reducirían los tiempos necesarios, pero esta ventaja no compensa todos los inconvenientes que tal combustible produciría. Para empezar, la antimateria es tan costosa de producir que a menudo se la denomina «la sustancia más cara del planeta» y utilizarla en los medios de transporte terrestre no sería rentable. Pero, ni siquiera si algún día se pudiera reducir el coste de la antimateria o se consiguiera de una fuente natural, no sería una buena idea usarla en el transporte terrestre, dado que en caso de

sufrir un accidente, la antimateria almacenada entraría en contacto con materia ordinaria y se produciría una explosión con suficiente energía para destrozar, como mínimo, los alrededores del lugar del suceso. Además de conseguir abaratar el precio de producción debería, en consecuencia, inventarse un método extremadamente seguro para almacenarla y transportarla, de manera que los costes que se acumularían situarían a los vehículos con antimateria en desventaja frente a otras soluciones más ventajosas, como los coches eléctricos o los trenes de levitación magnética.

Existe un caso particular en el que la antimateria podría servir de combustible en nuestro planeta: la exploración del mundo submarino. Como en el caso de los cohetes, un sistema que permitiera extraer la energía de la aniquilación materia-antimateria pesaría y ocuparía mucho menos que los actuales, lo que permitiría a los submarinos ser mucho más ligeros y espaciosos. Así pues, en un futuro previsible la antimateria podría llevarnos desde lo más profundo del planeta hasta el punto del espacio más lejano jamás alcanzado por los humanos: paradójicamente, el combustible más peligroso encontraría aplicación solo para las naves que se enfrentan a las condiciones de mayor adversidad para el ser humano.

Antimateria en nuestro interior

En el campo de la medicina, la antimateria hace años que se aplica de forma provechosa. A principios de la década de 1980, los físicos Ted Kalogeropoulos y Levy Gray, de la Universidad de Siracusa (Estados Unidos), descubrieron que irradiando antiprotones contra un objeto se puede obtener una imagen de su interior. Esto se aplica también al examen interno del cuerpo humano, para lo que desarrollaron una técnica para conseguir imágenes médicas que bautizaron como radiografía antiprotónica. Además de revolucionar este campo, descubrieron que el mismo haz de antiprotones podría

llegar a utilizarse para destruir tumores hoy inoperables o reparar lesiones profundas en el cuerpo humano: la radioterapia con antiprotones resultaría más efectiva que con protones, ya que al llegar a la zona deseada se aniquilarían con la materia, irradiando energía adicional, y se estima que los efectos colaterales serían menores.

Existe una técnica usada en medicina para obtener imágenes médicas denominada PET en la que en lugar de irradiar un cuerpo con antipartículas, se detectan los positrones que emiten en su desintegración algunos isótopos del carbono, del nitrógeno, del oxígeno y del flúor.

Al proporcionar al paciente fármacos con estos isótopos, preparados para que los absorban específicamente los tejidos diana del análisis, se puede estudiar una zona en concreto, ya que la mayor concentración de estos elementos intensifica la emisión de positrones en la zona, que al aniquilarse con los electrones del entorno emiten rayos gamma. Registrando y analizando estas emisiones y sus características, se obtiene una imagen muy detallada de la zona estudiada.

La cantidad de antimateria necesaria para las aplicaciones médicas es muy reducida y solo hace falta aumentarla un poco para ser usada, de forma similar, en ingeniería. La antimateria se puede usar para obtener imágenes de materiales más densos que los del cuerpo humano, como los metales, de manera que resulta útil para técnicas de análisis y construcción de sensores. Con las técnicas aplicadas de antimateria se pueden no solo detectar imperfecciones dentro de un bloque de metal, sino también calentar zonas muy localizadas para eliminarlas. Con algo más de antimateria incluso sería posible conseguir imágenes de objetos que no se encontraran cerca de la fuente de antiprotones, sino alejados centenares de metros. Por el momento, estas aplicaciones pueden ser usadas, por ejemplo, para detectar y arreglar desperfectos en estructuras de una forma muy poco invasiva, permitiendo intervenciones imposibles con cualquier otro procedimiento.

Crear materia con antimateria

A pesar de la importancia de todas las aplicaciones mencionadas, la más importante y útil para el futuro es el propio estudio de las propiedades de la antimateria, sin el cual no se hubieran desarrollado las aplicaciones prácticas ni se podrán desarrollar las aplicaciones futuras. El objetivo es descubrir la estructura de la antimateria, sus características, si sus propiedades son completamente simétricas a las de la materia o, por el contrario, si tiene alguna propiedad todavía no detectada que la haga más diferente de la materia convencional de lo que pensamos, de manera que no se podría continuar definiéndola como su gemela. Su estudio no solo es imprescindible para desarrollar futuras aplicaciones prácticas, sino que es aún más importante para ayudarnos a entender mejor el origen y la estructura del universo, especialmente los sucesos de los instantes justo después de que el Big Bang tuviera lugar.

En las violentas desintegraciones materia-antimateria que se provocan en grandes aceleradores se generan y detectan nuevas partículas, de las que se estudian las propiedades y las leyes y simetrías físicas que las rigen. De esta manera, el uso de la antimateria contribuye a desarrollar el modelo actual de la física de partículas, conocido como modelo estándar.

Cuando la antimateria consiga llegar a los laboratorios de física de las universidades, $E = mc^2$ se convertirá en la reacción más impresionante y energética que los estudiantes puedan llegar a observar.

UN CAMINO DE ANTIPARTÍCULAS

Teniendo en cuenta las maravillas de la antimateria y las pocas cantidades necesarias para usos prácticos, es lógico preguntarse por qué razón no es más usada y cuáles son los inconvenientes que

dificultan tanto su uso, además del ya mencionado prohibitivo coste económico de su producción.

Hay un inconveniente muy importante para su utilización, un fenómeno que es a la vez su mayor virtud y su peor defecto: el hecho de que la antimateria se aniquile al interaccionar con la materia. Por ello, es extremadamente difícil de almacenar y guardar, ya que se debe evitar cualquier contacto de las antipartículas con las partículas: no solo se tiene que introducir en un recipiente con un alto vacío, sino que además se debe evitar hasta el más mínimo contacto con las paredes. Debido a esta propiedad, el camino para llegar a manipular antimateria fue y sigue siendo largo y complicado.

Las primeras partículas de antimateria detectadas fueron positrones generados de forma natural, identificados en 1933, pocos años después de que Paul Dirac dedujera su existencia de forma teórica. No se consiguieron crear las primeras antipartículas de forma artificial hasta un par de décadas más tarde. Cuando se creó por primera vez antimateria en un acelerador de partículas, no se hizo pensando en las aplicaciones posteriores que pudiera tener, entonces inimaginables: el motivo por el que se creó fue porque faltaban evidencias empíricas de la existencia de cualquier antipartícula que no fuera el positrón. Se buscaba sobre todo conseguir antiprotones, cuya existencia parecía lógica y evidente según todas las previsiones teóricas, pero de los que veintidós años después de la detección del primer positrón aún no había muestra alguna.

El principal reto para generar antiprotones en un acelerador de partículas es que para crearlos se necesita mucha más energía que para obtener positrones, ya que su masa es 1836 veces mayor: la del antiprotón es de 938 MeV, mientras que la de un positrón es de 0,511 MeV. Por tanto, para crear un antiprotón es necesario generar una energía de $2 \times 938 = 1876$ MeV. El factor multiplicativo 2 se explica porque para conservar la carga neutra total se debe crear un par protón-antiprotón, ambos con idéntica masa, pues en caso

contrario se rompería la simetría, algo no permitido por las leyes de la mecánica cuántica, como ya había demostrado Dirac.

> En la ciencia hay un tribunal de última instancia: el experimento.
>
> Emilio Segrè

En 1954, un equipo de la Universidad de Berkeley liderado por el físico italiano Emilio Segrè y con los estadounidenses Clyde Wiegan, Thomas Ypsilantis y Owen Chamberlain se propuso romper esta barrera energética, para crear antiprotones y demostrar de forma empírica su existencia. Durante 18 meses trabajaron diseñando el experimento y poniendo a punto el Bevatrón, el acelerador de partículas del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, en California.

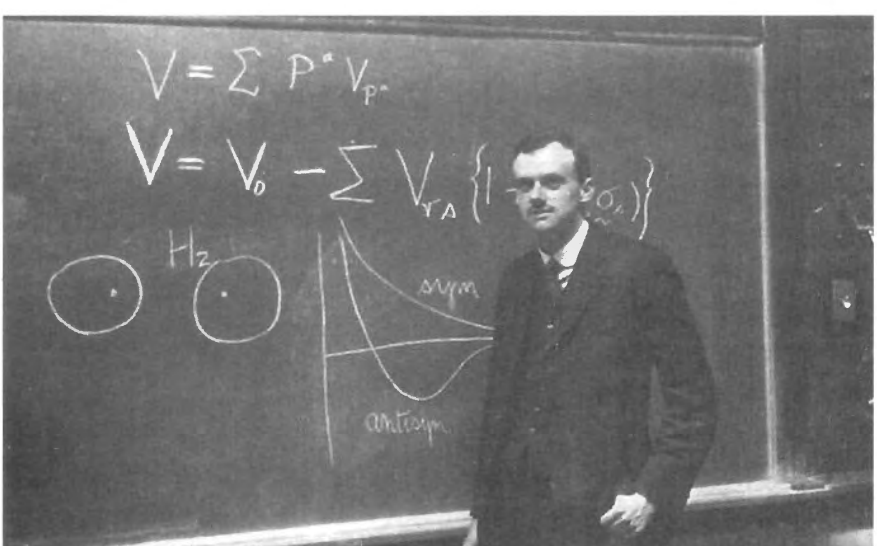
El Bevatrón era capaz de producir la energía suficiente para obtener antiprotones a partir de la energía desprendida en choques de partículas aceleradas muy energéticas contra un blanco estacionario. Así, a partir, por ejemplo, del choque de dos protones iniciales se pueden obtener cuatro partículas finales: los dos protones iniciales más un par protón-antiprotón, generado por la energía del impacto.

Los científicos que trabajaban en el proyecto tenían muy claro que tan importante era crear el antiprotón como ser capaces de detectarlo. Así que dotaron al Bevatron con tres dispositivos de detección, basados en procedimientos distintos:

- Placas con emulsión fotográfica colocadas detrás del blanco que se bombardeaba. Cuando una partícula interactuaba con la película fotográfica dejaba una marca que, al depender de las propiedades de la partícula, era única para cada tipo.
- Contador Cherenkov, que permitía identificar el tipo de partículas que lo atravesaba observando la denominada radiación Cherenkov, una emisión luminosa azulada causada por partículas cargadas eléctricamente que se desplazaban a altísima velocidad,

> PAUL DIRAC, PROFETA DE LA ANTIMATERIA

Paul Adrien Maurice Dirac (Bristol 1902-Tallahassee 1984) destacó desde la educación primaria por su habilidad para las matemáticas. Se graduó en 1921 en ingeniería eléctrica y en 1923 en matemáticas. Profesor de la Universidad de Cambridge, entre 1932 y 1969 ocupó la Cátedra Lucasiana, un cargo ejercido antes por Isaac Newton y más tarde por Stephen Hawking. Dirac se dedicó al estudio de la mecánica cuántica, campo en el que realizó contribuciones muy destacadas que le valieron el premio Nobel de Física de 1933, compartido con el físico austríaco Erwin Schrödinger. Es especialmente conocido por la llamada en su honor *ecuación de Dirac*, que describe, entre otros fenómenos, el comportamiento del electrón y que le permitió prever de forma teórica la existencia del positrón. Tal posibilidad le pareció tan inusual que no le dio importancia. Cuando pocos años más tarde se detectó por primera vez un positrón de forma experimental, Dirac declaró: «Mi ecuación es más inteligente que yo».



— Paul Dirac en una de sus clases, analizando un problema de simetrías.

impulsadas por la interacción entre los antiprotones y el material del detector.

- Contadores de partículas con cronómetros incorporados, para medir el lapso de tiempo que necesitaba cada partícula para atravesar el detector, deducir su velocidad y, en consecuencia, determinar el tipo de la partícula.

El 4 de octubre de 1955 se detectó en el Bevatrón el primer antiprotón, una sola antipartícula pero suficiente para despejar definitivamente las dudas sobre su existencia. El equipo publicó el descubrimiento en *The Physical Review Letters* dos semanas más tarde, un resultado que fue recibido como la confirmación de las expectativas de la comunidad científica, que, tras la detección del positrón y las previsiones teóricas de Dirac, se hubiera mostrado más sorprendida por un resultado negativo. Por este logro, Segrè y Chamberlain recibieron el premio Nobel de Física de 1959.

La veda para crear antipartículas quedó abierta y en lugar de los más de veinte años que se había tenido que esperar entre la detección del positrón y la del antiprotón, en el Bevatrón tan solo se tardaron once meses en descubrir los primeros antineutrones. Los aceleradores de partículas evolucionaron con rapidez, alcanzando hoy día niveles de energía que antes eran impensables. Los nuevos y más modernos aceleradores de partículas en el CERN o el Fermilab ganaron la batalla al Bevatrón, que fue perdiendo protagonismo en el mundo de la física de partículas hasta que en 2009 empezó su desmantelamiento.

Así, los primeros pasos, crear y detectar antimateria, se habían conseguido. Sin embargo, no era suficiente para estudiar sus propiedades. El siguiente paso era conseguir almacenarla, es decir, mantenerla al menos unos segundos sin que se aniquilara con la materia, para posibilitar su análisis.

Otra vez los científicos tuvieron que esperar más de veinte años para conseguir realizar con éxito su objetivo. Por fin, el 18 de agos-

to de 1978 el CERN publicó una nota de prensa anunciando que habían conseguido almacenar antiprotones por primera vez en la historia. Algunos centenares de antiprotones se habían mantenido circulando en un dispositivo denominado ICE (Initial Cooling Experiments) durante un período de 85 horas; previamente a esto, el máximo tiempo que se había conseguido mantener antiprotones sin aniquilarse era de una diezmilionésima fracción de segundo. La capacidad de almacenar antiprotones permitió producir en 1981, también en el CERN, los primeros choques de protones contra antiprotones, que condujeron a grandes descubrimientos en la física de partículas.

Después de estos logros, los científicos querían llegar mucho más allá y seguir explorando y descubriendo el mundo de la antimateria. Tocaba dominar la antimateria como si fuera materia convencional: había llegado la hora de formar el primer antiátomo. El 15 de septiembre de 1995 se consiguió formar antiátomos de hidrógeno, el antielemento más sencillo, que consta solo de un antiprotón y un positrón. Otra vez el hito tuvo lugar en el CERN, esta vez usando el LEAR (Low Energy Antiproton Ring, anillo de antiprotones de baja energía). Los antiátomos tardaron alrededor de 40 bilionésimas de segundo en reaccionar con materia, pero este intervalo fue suficiente para que dejaran marcado su paso en la historia de la ciencia.

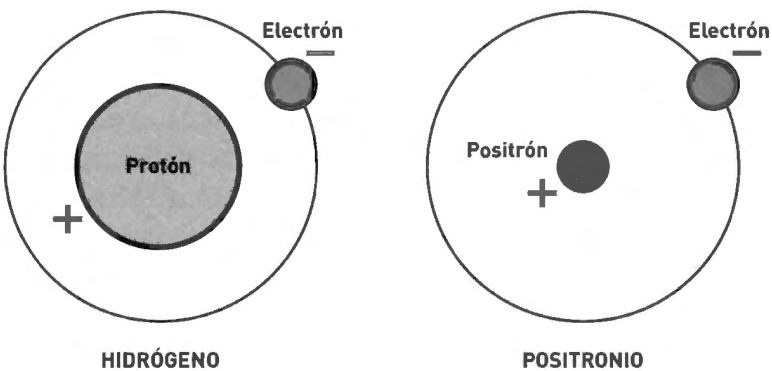
La física de partículas siguió avanzando a un ritmo cada vez más rápido: en 2002 se consiguió crear antiátomos fríos, que se movían a velocidades relativamente bajas, lo que facilitaba el estudio de sus características, y en junio de 2011 se logró almacenar los antiátomos durante unos 16 minutos, un período de tiempo excepcionalmente largo comparado con la escala de los fenómenos estudiados por la física de partículas, donde gobiernan tamaños extremadamente pequeños y velocidades excepcionalmente altas, de manera que todo cambio sucede muy deprisa, en comparación con nuestros estándares.

Detectar antimateria en la naturaleza

Para crear antimateria de forma artificial se necesita emplear grandes cantidades de energía. Sin embargo, el universo está lleno de sistemas y fenómenos que implican energías muy superiores a la necesaria para crear antimateria, por lo que no es descabellado suponer que en algunos de estos pueda encontrarse una fuente natural de antimateria. De hecho, los primeros positrones que detectó Carl David Anderson en 1932 eran el producto de la colisión de rayos cósmicos con materia ordinaria.

Para localizar la presencia de partículas y antipartículas en el universo, los científicos situaron en las capas superiores de la atmósfera unos detectores de partículas que revelaron en el corazón de nuestra galaxia un objeto abundante en positronio, un seudoátomo formado por un electrón que orbita alrededor de un positrón, como se muestra en la figura 4. Su desintegración tiene una signatura muy concreta, dos rayos gamma con energía de 0,511 MeV,

Fig. 4



Las estructuras de un átomo de hidrógeno y de uno de positronio solo se distinguen por su núcleo, que en el hidrógeno es un protón, mientras que en el positronio lo forma un positrón.

> LA MAYOR MÁQUINA JAMÁS CONSTRUIDA

El CERN, la Organización Europea para la Investigación Nuclear, es el mayor laboratorio de investigación de física de partículas del mundo. Fundado en 1954 y construido en la frontera entre Francia y Suiza, muy cerca de Ginebra, en sus instalaciones se han hecho grandes descubrimientos, como el del bosón de Higgs, una partícula indispensable para corroborar el modelo actual de física de partículas. El CERN cuenta con nueve aceleradores de partículas, el mayor de los cuales es el LHC (Large Hadron Collider, gran colisionador de hadrones), que con un anillo de 27 km de longitud ha sido descrito como «la mayor máquina jamás construida por el ser humano». Está preparado para realizar siete tipos de experimentos, entre ellos los denominados ALPHA y ASACUSA: en el primero, se capturan átomos de antihidrógeno y se comparan con los de hidrógeno, examinando si existe alguna diferencia inesperada entre ellos; el segundo experimento estudia las colisiones entre materia y antimateria.

— Instalaciones subterráneas del anillo acelerador del LHC, en el CERN.

que permiten identificar su causa y su ubicación. Se trata, como es obvio, de una fuente de antimateria inaccesible.

La fuente de antiprotones más abundante en las proximidades de la Tierra se encuentra en los cinturones de Van Allen, una zona de la magnetosfera terrestre en la que se concentra gran número de partículas cargadas, en tales cantidades que algunos estudios de la NASA plantean recolectar mediante campos magnéticos la antimateria que se forma en estas estructuras.

Aunque se conocen otras pocas fuentes naturales de antimateria en la galaxia, no hace falta explorar todo el universo para aventurarnos a asegurar que no son muchas. Igual que la aniquilación electrón-positrón tiene su propia signatura, también la tienen el resto de las aniquilaciones entre pares de partícula y antipartícula. Los científicos conocen muy bien las características de las señales que se recibirían y están atentos a su detección. Como hasta el momento no hay una recepción abundante, se puede deducir que no deben existir muchas fuentes naturales de antimateria.

Para el estado actual de la ciencia no hay duda de que en el universo hay muchísima más materia que antimateria, e incluso hay pruebas científicas que demuestran que ya había la misma falta de antimateria hace billones de años. Esto plantea la pregunta por las causas de este desequilibrio. Como se ha demostrado teórica y empíricamente, la creación de materia y antimateria es simétrica, es decir, por la creación de cada partícula se debe crear su antipartícula correspondiente. Si toda la materia existente en el universo se creó en el Big Bang, debería haber, según este principio, la misma cantidad de materia que de antimateria. Sin embargo, pruebas experimentales muestran que también se creó antimateria, pero en cantidades diferentes. Así pues, hubo una ruptura de la simetría que permanece inexplicada: se ignora si la naturaleza prefiere la materia a la antimateria por algún motivo, o si tan solo fue un accidente. Por el momento, de lo único que podemos estar seguros es de que si a algo le debemos nuestra

existencia es a la asimetría después del Big Bang entre la materia y la antimateria.

Por su parte, del conocimiento de la antimateria podemos esperar el desarrollo de nuevas tecnologías y aplicaciones de las que tan solo empezamos a vislumbrar las primeras posibilidades, como técnicas médicas de diagnóstico y tratamiento, la capacidad de realizar operaciones de ingeniería ahora imposibles y en un futuro no muy lejano, incluso la propulsión de naves que puedan llevarnos más allá de los límites del sistema solar. Pero, por encima de todo, el conocimiento de la antimateria puede ser una pieza clave para entender las leyes más profundas de la naturaleza, que explicarían el origen y el futuro del cosmos.

02 DIVIDIR LO INDIVISIBLE

Durante el siglo XX, una de las principales metas de la física fue identificar las partículas subatómicas y construir una teoría que diera razón de sus características, con la esperanza de explicar las propiedades de la materia y de la energía. Muy pronto se vio que este empeño tenía que contar con algo antes completamente inesperado: la antimateria.

Los patrones del universo son muy similares a los que reinan en el mundo subatómico: mientras en el cosmos los planetas, estrellas e incluso las galaxias orbitan alrededor de un centro de gravedad, en el mundo nanométrico los electrones orbitan de una forma muy similar alrededor de un núcleo, solo que en este caso la causa es la fuerza eléctrica. Durante el siglo XX, ambos campos demostraron estar íntimamente relacionados, explicando la inmensidad del cosmos a partir de la física de partículas. La tendencia a relacionar las estructuras del macrocosmos y del microcosmos se pueden reconocer incluso en las civilizaciones más antiguas, que se preguntaban cuáles eran las leyes que gobernaban la Tierra, el Sol y el universo, en qué consistía el cosmos y de qué estaba formada la materia.

Los primeros en proponer la idea de una unidad indivisible de la materia, a la que llamaron *átomo*, fueron los filósofos griegos Leucipo y Demócrito, a mediados del siglo V a.C. Poco después, Platón propuso la doctrina que defendía la existencia de cuatro partículas formadas por diferentes poliedros regulares, cada una de las cuales representaba uno de los cuatro elementos de la naturaleza: el

fuego, el aire, el agua y la tierra. Esta línea de pensamiento, conocida como atomismo, no encontró continuidad durante siglos, hasta que en 1662 el físico inglés Robert Boyle recuperó la noción del átomo como la cantidad más pequeña de materia y la usó para explicar la posibilidad de comprimir gases, ya que esto implicaba que tenía que haber espacios vacíos entre los componentes del gas.

La teoría atomista se fue perfilando conforme se adaptaba a los resultados experimentales, y en el siglo XX tanto la física de partículas como las matemáticas que las describían evolucionaron en una relación muy estrecha. En la década de 1930 por primera vez se pronosticó de forma teórica la existencia de una partícula antes de su detección experimental: se trataba del positrón, la antipartícula del electrón. Mediante la combinación de teoría y práctica, de experimentos físicos y de ecuaciones matemáticas, se ha llegado a desarrollar un modelo que explica de forma unificada todas las interacciones conocidas de la naturaleza, con excepción de la gravedad. Este modelo, conocido como *modelo estándar*, sirve no solo para prever la existencia de la antimateria, sino que la contempla como un elemento esencial e indispensable para que pueda haber la materia común que conocemos y de la que estamos formados.

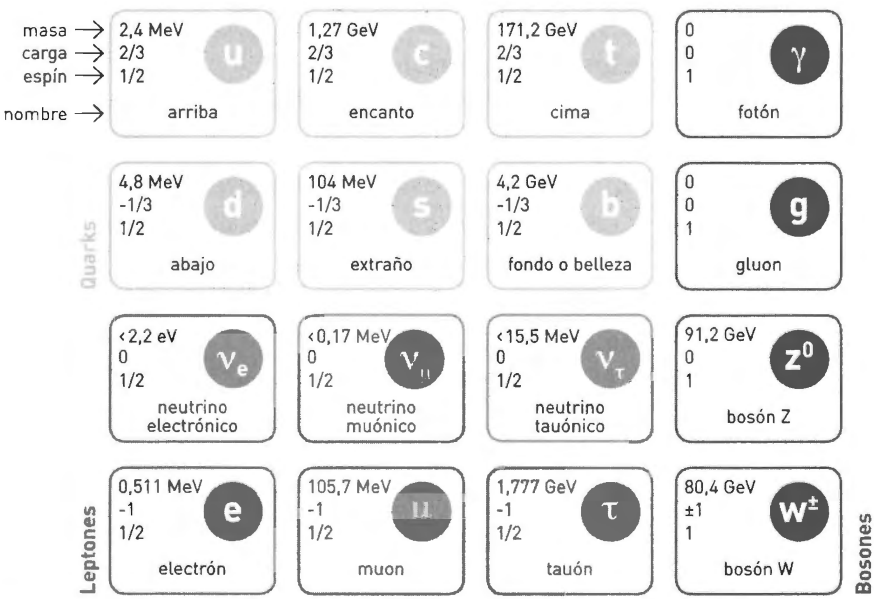
DESMONTANDO EL ÁTOMO

La base de la teoría atómica actual fue definida en 1808 por el químico británico John Dalton, quien propuso que los átomos eran esferas indivisibles e inalterables bajo cualquier proceso químico. Aunque esta imagen ha quedado desmentida, algunas de las ideas de Dalton se han convertido en fundamentos de la química moderna, como, por ejemplo, la afirmación de que los átomos con unas mismas características corresponden a un mismo elemento.

Más adelante, físicos como los británicos William Prout y Norman Lockyer defendieron que los átomos estaban formados por

> EL CATÁLOGO DE LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES

A principios de la década de 1960, los físicos se enfrentaban a lo que se denominó el *zoológico de partículas*: se habían identificado centenares de partículas subatómicas, que formaban una colección acumulativa, sin un orden claro. La situación cambió en 1964, cuando el estadounidense Murray Gell-Mann presentó el modelo teórico de los quarks, un nuevo tipo de partículas del que no se obtuvieron pruebas experimentales hasta 1973. Muchas de las antes consideradas elementales, como el protón y el neutrón, pasaron a definirse como compuestas por quarks, lo que redujo la lista de las verdaderamente elementales a 16, el núcleo del modelo estándar, que da razón de las demás. Existen también las correspondientes antipartículas, excepto en los casos de neutrinos y fotones, que se consideran sus propias antipartículas.

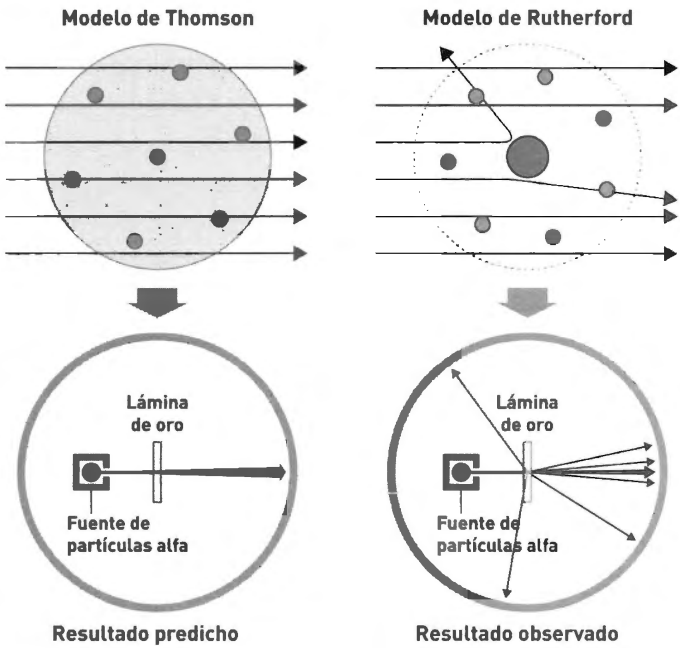


— Las partículas elementales del modelo estándar, con sus principales propiedades, organizadas en tres grupos: quarks, leptones y bosones.

partículas todavía más pequeñas, una teoría que no tuvo mucha aceptación hasta que en 1897 Joseph John Thomson observó que los rayos catódicos (que luego se descubrió que se trataba de electrones acelerados por un campo eléctrico) podían viajar mucho más lejos en el aire de lo que se podría esperar si las partículas que los formaban tuvieran un tamaño similar al de un átomo. Los cálculos de Thomson establecieron que, por la relación entre la masa y la energía de estas partículas, tenían que ser más de 1 000 veces menores que el átomo de hidrógeno, y comprobó que este resultado no variaba en función del elemento utilizado para producir los rayos catódicos. Así, Thomson descubrió que todos los átomos contenían unas partículas mucho menores, con carga eléctrica negativa: había descubierto los electrones, dividiendo lo hasta entonces considerado indivisible. En 1904 propuso un nuevo modelo atómico que conseguía mantener el carácter eléctricamente neutro del átomo y a su vez incorporaba los electrones, describiendo el átomo como una esfera de materia cargada positivamente con electrones incrustados en su interior.

El científico japonés Hantaro Nagaoka rechazó el modelo de Thomson, alegando que las cargas eléctricas no pueden penetrar entre sí, y propuso un nuevo modelo atómico en el que los electrones orbitaban alrededor de la carga positiva, de forma parecida a como los anillos de Saturno orbitan alrededor del planeta. La falta de pruebas experimentales supuso que sus predicciones no tuvieran demasiada repercusión en su momento. Esta situación cambió entre 1908 y 1911, cuando el físico neozelandés Ernest Rutherford diseñó un experimento (fig. 1) para determinar la distribución de electrones dentro del átomo. Para ello, Rutherford bombardeó una lámina de oro muy fina con partículas alfa (núcleos de helio, formados por dos protones y dos electrones), esperando que, si el modelo de Thomson era correcto, atravesarían la lámina sin dificultad, salvo una pequeña fracción, que debería experimentar una muy ligera dispersión debida a la interacción eléctrica.

Fig. 1



En el experimento de Rutherford, si el átomo hubiera tenido la estructura propuesta por Thomson, la dispersión del haz de partículas alfa hubiera sido muy pequeña. El resultado experimental llevó a Rutherford a plantear un modelo atómico con una distribución diferente.

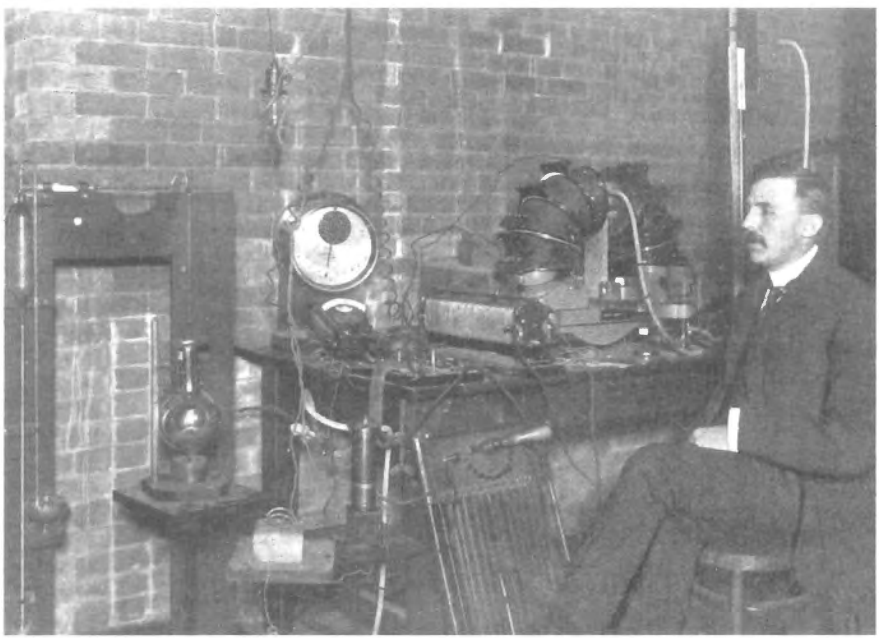
El resultado experimental fue una sorpresa, ya que se observó que la gran mayoría de partículas atravesaron la lámina como si no hubiera interacción alguna, otras pocas eran desviadas ligeramente, pero algunas sufrían un desvío de su trayectoría de más de 90°, llegando incluso a invertir su desplazamiento. Estos hechos no se ajustaban en absoluto al modelo de Thomson, así que Rutherford propuso un nuevo modelo, en el que el átomo consistía en un núcleo, donde se concentraba la carga positiva, rodeado por una nube de electrones con carga negativa, dejando una gran parte del espacio vacío.

Este nuevo modelo explicaba a la perfección los resultados de los experimentos de Rutherford, pero seguía presentando algunas debilidades. De acuerdo con el conocimiento científico de la época, un electrón orbitando alrededor del núcleo debería de perder energía en forma de radiación electromagnética, lo que tendría como consecuencia que los electrones acabarían por caer hacia el núcleo, perdiendo su carga positiva y convirtiéndose en partículas electricamente neutras. Como no se repelerían entre ellos, en una fracción de segundo la materia colapsaría sin preservar ni forma ni tamaño: así, toda la masa de una casa ocuparía un volumen menor que el de un grano de arena.

La radiactividad se muestra acompañada de cambios químicos, por lo que se concluye que debe poseer un carácter subatómico.

Ernest Rutherford

A esta dificultad teórica de primer orden se le añadían resultados experimentales que no concordaban al cien por cien con el modelo de Rutherford. Durante el siglo XIX se había observado que los gases tienen un espectro luminoso concreto y único, es decir, que absorben determinadas longitudes de onda de luz, dependiendo exclusivamente de su composición química. El examen del espectro del átomo de hidrógeno llevó en 1913 al físico danés Niels Bohr a proponer que esto ocurría porque los electrones no pueden orbitar libremente alrededor del núcleo, sino que solo pueden hacerlo en las órbitas con determinados niveles de energía permitidos. Según el modelo de Bohr, la energía necesaria para que un electrón se encuentre en una órbita determinada aumenta a medida que se aleja del núcleo. Así, para cambiar de nivel, un electrón necesita absober o emitir energía, según si pasa a una órbita más alejada o más cercana al núcleo, respectivamente. Las líneas que se observan en los espectros de un determinado elemento estarían definidas por la energía en forma de luz necesaria para que un electrón salte de un nivel de energía a otro.

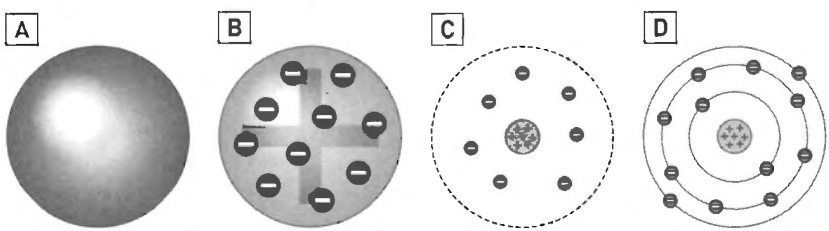


— Los físicos Joseph John Thomson (arriba a la izquierda), Ernest Rutherford (abajo, fotografiado en su laboratorio en la Universidad McGill) y Niels Bohr (arriba a la derecha) propusieron, sucesivamente, tres modelos distintos de la estructura interna del átomo, que daban cuenta de los respectivos resultados experimentales.

El modelo atómico de Bohr, que refinó las propuestas de Dalton, Thomson y Rutherford (fig. 2), resulta imposible en el marco de la física clásica, en el que los niveles de energía pueden tener cualquier valor que se quiera. Pero a principios del siglo XX se estaba desarrollando la mecánica cuántica, una rama de la física que contempla el hecho de que la energía no es continua, es decir, está cuantificada para determinados valores posibles. Se puede explicar la diferencia entre estos dos modelos estableciendo un símil: si se desea colgar estantes en una pared en un mundo gobernado por la física clásica, se pueden colocar a cualquier altura respecto del suelo; por el contrario, si las leyes de la física fueran las de la mecánica cuántica habría solo algunas alturas permitidas, por ejemplo, 1 m, 1,5 m, 1,75 m y 2 m. En el marco de la mecánica cuántica, suponiendo que se colocara un estante a cada altura permitida se podrían poner libros en cada uno de ellos, de modo que cuanto más elevado estuviera el estante, más energía potencial tendría el libro, y si un libro se bajara de un estante a otro inferior, su energía disminuiría, como hace la energía de los electrones al disminuir de nivel energético.

El modelo de Bohr tuvo que ser modificado, ya que no podía explicar los espectros de otros elementos más pesados que el hidrógeno, aunque se mantuvo el uso de la mecánica cuántica para

Fig. 2



Al comparar los modelos atómicos de Dalton (**A**), Thomson (**B**), Rutherford (**C**) y Bohr (**D**), se observa que la estructura interna del átomo ha pasado a representarse cada vez de forma más compleja.

desarrollar un nuevo modelo atómico: permaneció la idea de que los electrones tienen ciertos niveles de energía permitidos, y además se añadió que cada uno de ellos puede estar ocupado por un número máximo de electrones; así, los niveles se van rellenando desde el nivel de menor energía, determinando las características de cada elemento. Una de las observaciones experimentales que se tuvieron que incluir en el nuevo modelo fue la existencia del espín del electrón, cuyas primeras evidencias fueron observadas por los físicos alemanes Otto Stern y Walther Gerlach en un experimento realizado en 1922.

Con todos estos resultados, el átomo dejó de considerarse la mínima unidad de materia: ya no era indivisible, estableciéndose que consistía en electrones orbitando alrededor de un núcleo con carga positiva. Pero aún quedaba mucho por descubrir, y por dividir. Después del descubrimiento de los electrones, portadores de la menor cantidad de carga negativa conocida hasta el momento, por lo que a menudo se le atribuye el valor −1, se hizo concebible la posibilidad de partículas portadoras de la carga positiva, con un valor +1, disgregando el núcleo atómico que aún se consideraba como un solo cuerpo. En 1917, Rutherford demostró que los núcleos de hidrógeno se podían combinar para formar otros núcleos, lo que se reconoció como el descubrimiento del protón, ya que el núcleo de hidrógeno estaba formado por un solo protón. En 1932, el británico James Chadwick descubrió el neutrón, con lo que se consiguió explicar el exceso de masa concentrada en el núcleo atómico.

A finales del siglo XIX y principios del XX, los descubrimientos anteriores y otras teorías desarrolladas en otros campos de la física pusieron en evidencia la incapacidad de la física clásica para explicar todas las interacciones de la naturaleza. Las leyes de Newton eran suficientes para explicar las interacciones a escala humana, pero se demostró que no servían para el mundo subatómico o sistemas cercanos a la velocidad de la luz. Los más grandes físicos y ma-

temáticos de la época tuvieron que desarrollar nuevas ramas, como la mecánica cuántica y la relatividad, para definir las interacciones bajo estas condiciones, marcando así el comienzo de una nueva era en el avance de la ciencia.

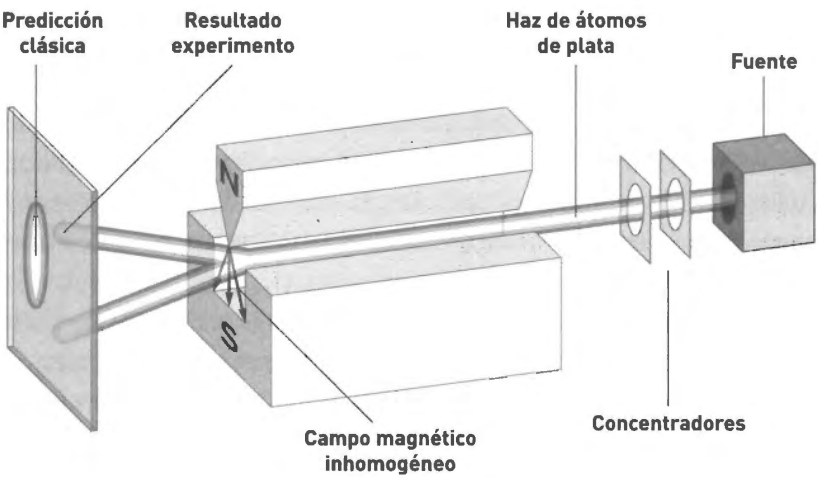
UNOS INVITADOS INESPERADOS

Las nuevas teorías físicas que desde principios del siglo XX lograron explicar resultados experimentales antes inexplicables también tenían sus puntos débiles. La relatividad y la mecánica cuántica se habían definido de forma independiente, de modo que los sistemas cuánticos no se podían explicar desde un punto de vista relativista ni vicecersa: los fenómenos relativistas no encajaban con las condiciones de la mecánica cuántica. Los fenómenos naturales, sin embargo, no están sujetos a estas distinciones y mezclan características de ambas teorías: las partículas subatómicas, por ejemplo, se desplazan a velocidades cercanas a la de la luz y, por tanto, también se deben considerar dentro de un marco relativista.

En 1928, Paul Dirac presentó una ecuación para definir el comportamiento del electrón que era perfectamente consistente con la mecánica cuántica y la relatividad especial. La ecuación de Dirac cerró todos los interrogantes sobre el comportamiento de los electrones, pero abrió nuevas cuestiones por resolver. La más importante es que la ecuación de Dirac aceptaba infinitas soluciones de energía negativa, lo que implicaba que no había un límite inferior de energía para el electrón. Según esto, un electrón podría caer en un pozo sin fondo, produciendo una cantidad infinita de energía sin recibir ninguna. Este resultado no solo entraba en contradicción con los resultados experimentales, en los que se podía identificar un estado de mínima energía del electrón, sino también con las leyes de conservación de la energía. Dirac encontró una explicación a este fenómeno: justificó las infinitas soluciones negativas de

> LA DIFERENCIA ENTRE UNA LÍNEA Y DOS PUNTOS

El experimento Stern-Gerlach fue el primero en hallar pruebas de la existencia en las partículas de propiedades cuánticas intrínsecas. Consistía en enviar un haz de átomos de plata a través de un campo magnético, cuya intensidad crecía en dirección perpendicular a la del movimiento del haz. Si las partículas no tuvieran propiedades cuánticas, el resultado sería que su momento magnético se orientaría en cualquier dirección y, al atravesar el campo magnético, serían desviadas hacia arriba o hacia abajo según la orientación del momento magnético, cubriendo todo el rango de intensidades, formando una línea. Pero se observó que, aunque el desvío se daba en dos direcciones opuestas, siempre tenía la misma intensidad, agrupando los resultados en dos puntos, lo que significaba que el momento magnético solo tiene dos posiciones posibles. Este fenómeno solo se podía explicar aceptando la existencia de una propiedad cuántica nueva presente en las partículas, conocida luego como espín.



— En el experimento Stern-Gerlach, el haz de átomos se divide en dos haces separados, correspondientes a los dos valores cuánticos del espín de las partículas.

la ecuación argumentando que en cada punto del universo había una cantidad infinita de masa y una cantidad infinita de energía, pero que eran indetectables ya que estaban todos ocupados por electrones. Esta infinidad de estados fue bautizada con el nombre de *mar de Dirac*. Sin embargo, Dirac se dio cuenta de que si se proporcionaba suficiente energía un electrón podía abandonar su lugar, creando un hueco con exactamente la misma carga que el electrón, pero positiva. Además, los electrones vecinos podían ocupar el lugar vacío, cambiando así la localización del hueco, de manera que sería imposible distinguir entre un hueco en movimiento o una partícula con la misma carga que el electrón, pero de signo opuesto.

> Un estado de energía negativa desocupado aparecerá como algo con una energía positiva. Asumimos que estos estados son los positrones.
>
> Paul Dirac

En aquel entonces ya se había descubierto el protón, una partícula con características parecidas, pero Dirac se dio cuenta de que en su mar también se debía tener en cuenta la masa de las partículas que ocupaban los huecos, de modo que si un electrón abandonaba su sitio, este debía poder capturar una partícula con exactamente la misma masa que el electrón, no casi 2000 veces mayor como era el caso de la masa del protón respecto a la del electrón. Dirac no tuvo otra salida que predecir, de forma muy reticente, la existencia de una partícula con la misma masa que el electrón pero de carga positiva, que actualmente se conoce como positrón.

Esta fue la primera vez que se predijo una partícula de forma teórica, sin una evidencia experimental previa. El positrón fue detectado por primera vez en 1932 por el físico estadounidense Carl David Anderson, que lo identificó por el rastro que dejó en una cámara de niebla con la que intentaba identificar las partículas provenientes de los rayos cósmicos. En estos dispositivos, cuando una partícula pasa a través del vapor de agua que llena

la cámara, se condensan pequeñas gotas de agua a su alrededor, marcando su trayectoria, que se puede fotografiar. Si además se aplica un campo magnético, la trayectoria de las partículas se desvía y, como cada partícula cambia su trayectoria de una manera característica, se puede deducir de qué tipo de partícula se trata.

Las trayectorias de algunas partículas ya conocidas, obtenidas a partir de desintegraciones radiactivas, se usaron como referencia para comparar sus propiedades con las de las partículas que los rayos cósmicos traen a la Tierra, y así poder identificar estas últimas. Anderson, mientras trabajaba en el Instituto Tecnológico de California (Caltech) detectó que había una partícula que seguía exactamente la misma trayectoria que un electrón, pero en direccción opuesta. La hipótesis más plausible parecía ser que no era más que un electrón viajando en dirección contraria, es decir, del suelo hacia el cielo. Con el fin de comprobarlo, Anderson decidió colocar una placa de plomo de 6 mm con orientación horizontal en mitad de la cámara: de este modo, al atravesar la placa las partículas disminuirían su velocidad y su curvatura se incrementaría; por tanto, podría descubrir si una partícula venía del cielo, en cuyo caso su velocidad sería mayor y su curvatura menor en la mitad superior de la cámara o, por el contrario, si venía del suelo. Los resultados de esta modificación del experimento demostraron que todas las partículas provenían del cielo, de manera que la nueva partícula no era un electrón viajando en dirección contraria, sino el primer positrón detectado.

Con el tiempo se vio que la ecuación de Dirac no solo servía para describir el comportamiento del electrón, sino también el de otras partículas subatómicas. Se hizo evidente que tener una antipartícula ya no era un privilegio único del electrón, sino una exigencia matemática para todas las partículas. El conjunto de estas antipartículas forman lo que hoy en día se conoce como antimateria.

Girar espacio y tiempo, girar materia y antimateria

La teoría del mar de Dirac se adapta bastante bien a las observaciones experimentales sobre la antimateria. Se puede considerar que cuando un electrón rellena uno de los huecos de ese mar debe desprender una cantidad de energía determinada por la ecuación relativista $E = mc^2$. De ser así, tanto el electrón como su hueco (el positrón) se convierten en indetectables (es decir, se aniquilan) y solo se puede observar la energía radiada, que equivale a $2mc^2$, ya que se debe tener en cuenta tanto la masa del electrón como la del positrón.

De todas las teorías sobre la naturaleza de la antimateria, John Archibald Wheeler, un profesor asistente de la Universidad de Princeton, fue seguramente el que tuvo la idea más alocada de todas. El científico estadounidense justificó el hecho de que todos los electrones tuvieran exactamente las mismas características afirmando que todos son un mismo y único electrón. Wheeler se dio cuenta de que matemáticamente no hay ninguna diferencia entre un positrón y un electrón que viaje hacia atrás en el tiempo, de modo que todos los objetos del universo podrían estar formados por el mismo electrón, que viajaría adelante y atrás en el tiempo, manteniendo siempre las mismas propiedades.

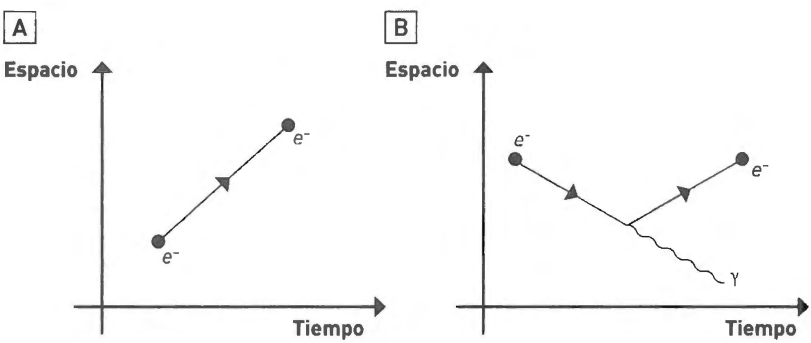
Cuando Wheeler le contó su idea a Richard Feynman, este detectó inmediatamente el problema que presentaba esta teoría: en el caso de que fuera cierta, se debería poder detectar exactamente el mismo número de electrones que de positrones, ya que la partícula debería invertir el sentido en el que viaja en el tiempo hacia delante y hacia atrás exactamente el mismo número de veces. Sin embargo, en la naturaleza no se encuentra la misma cantidad de positrones que de electrones, lo que invalidó esta teoría.

Feynman, por su parte, abordó la mecánica cuántica desde una perspectiva completamente nueva, como solía hacer cuando algún detalle no le acababa de cuadrar. Para llegar a comprender las inter-

acciones entre partículas, empezando por los electrones, ideó unos diagramas, conocidos hoy como diagramas de Feynman, en los que se muestra el movimiento de las partículas en el espacio y el tiempo, y sus transformaciones. Los diagramas de Feynman, que hoy se usan para describir interacciones entre todos los tipos de partículas, se aplicaron por primera vez para representar los fenómenos propios de los electrones. El caso más sencillo es representar un electrón (e^-) que viaja en línea recta entre dos puntos del espacio (fig. 3a), ya que solo es necesario trazar una línea recta entre las posiciones inicial y final, y precisar con una flecha la dirección del movimiento en el tiempo, es decir, si se mueve hacia delante o hacia atrás. Debido a las leyes de conservación de la física, sin la aparición de otra partícula el electrón seguiría viajando en línea recta eternamente, ya que no podría cambiar espontáneamente de dirección. Para variar su trayectoria (fig. 3b), necesita irradiar un fotón (γ).

Feynman pensó que su desarrollo tenía sentido en el marco de la mecánica cuántica, pero como ya antes había descrito Dirac con su ecuación, el movimiento de un electrón también debería tener

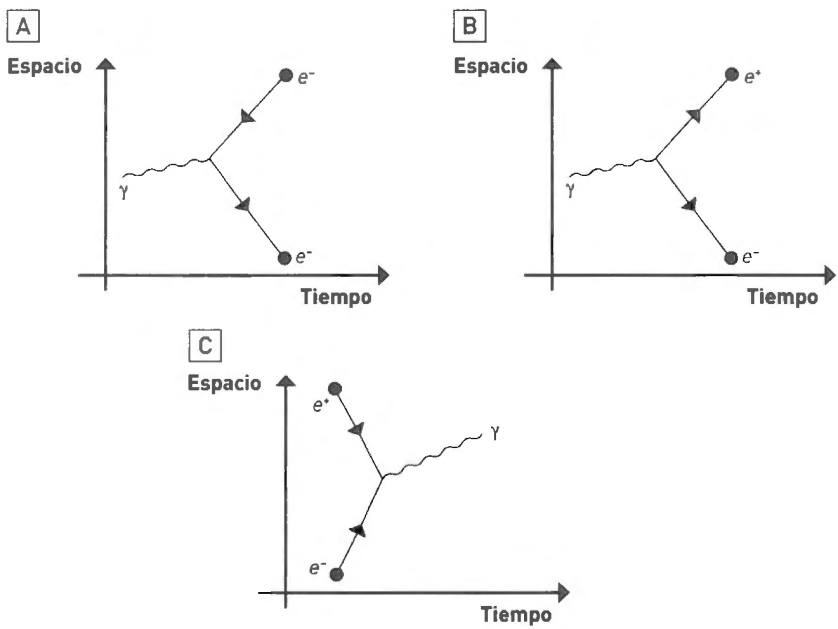
Fig. 3



La simplicidad de los diagramas de Feynman permite representar de forma muy intuitiva las trayectorias de un electrón que viaja en línea recta (**A**) o de uno que cambia su dirección (**B**).

sentido dentro de la teoría de la relatividad espacial, que indica que debe existir una simetría espacio-temporal, lo que implica que si los diagramas se girasen 90° aún deberían seguir describiendo el comportamiento real de las partículas. Cuando se le aplica este giro al diagrama que representa el caso de un electrón que cambia de dirección, se obtiene un fotón que espontáneamente crea dos electrones, uno viajando hacia delante en el tiempo y el otro viajando hacia atrás (fig. 4a). Como anteriormente se ha mencionado, un electrón viajando hacia atrás en el tiempo equivale a un positrón (*e*+) viajando hacia delante, por lo que se deduce que el fotón se convierte en un electrón y un positrón que viajan en el flujo normal del tiempo (fig. 4b). Por

Fig. 4



Un mismo diagrama de Feynman puede representar diferentes procesos, con modificaciones como cambiar un electrón (**A**) por un positrón (**B**) o un giro respecto de los ejes de coordenadas (**C**).

último, solo es necesario volver a rotar el diagrama para que, en lugar de la creación de un par de partículas, lo que se represente sea la aniquilación de una partícula con su antipartícula (fig. 4c): cuando un electrón y un positrón coinciden en el espacio y en el tiempo, desaparecen dejando en su lugar pura energía.

Cuando Feynman presentó sus diagramas no incidió demasiado en las matemáticas que los explicaban, pero su adecuación a los casos experimentales hizo que contaran con una gran aceptación entre los físicos que investigaban las propiedades de las partículas subatómicas. Mediante los diagramas de Feynman se puede explicar la creación espontánea de pares partícula-antipartícula, dentro del marco tanto de la mecánica cuántica como de la relatividad espacial.

Uno más uno ¿son tres?

Los diagramas de Feynman muestran cómo a partir de pura energía se pueden crear pares partícula-antipartícula, como también establecían las soluciones de la ecuación de Dirac, según las cuales si se disparan electrones contra una barrera eléctrica, se ha de obtener el doble de electrones en el haz repelido de los que había en el haz original. En un inicio esto parecía tan increíble como si de repente se descubriera que una de las soluciones de las ecuaciones de Newton predijera que por cada pelota de fútbol lanzada contra una pared recibiríamos dos de vuelta. Por suerte para los deportistas, las leyes de la mecánica cuántica y las de la física clásica son muy distintas, y lo que es posible para los electrones es imposible para los balones.

La respuesta a este enigma se encuentra al mirar en dirección contraria, ya que en la barrera se crean pares electrón-positrón: como resultado de los choques, se obtiene que por cada electrón del haz incidente queda el mismo electrón más uno nuevo y un posi-

trón. Donde inicialmente había una sola partícula, de repente hay tres. Los dos electrones son repelidos y regresan hacia el origen del haz, mientras que los positrones se mueven en la dirección opuesta.

La realización de este experimento es de gran dificultad, ya que no es fácil conseguir una barrera eléctrica: si se intenta crearla interponiendo una placa de metal, la mayoría de electrones del haz pasan a través, como ya había demostrado Rutherford. La mejor forma de crear una barrera eléctrica es establecer una barrera de partículas cargadas, en particular de electrones. Al llevar a cabo el experimento bajo estas condiciones, se observa cómo se crean electrones y positrones, según lo previsto por la teoría cuántica.

Este método todavía es la forma más efectiva para crear positrones. El procedimiento que se usa en los aceleradores de partículas para crear antipartículas se basa en este mismo principio científico: se hacen chocar frontalmente dos haces de partículas (no tienen por qué ser electrones) a altas velocidades. La energía del choque puede crear diferentes tipos de partículas, en función del tipo de las iniciales: las resultantes no son las mismas si los haces iniciales son de protones o de electrones. Los experimentos llevados a cabo en los aceleradores de partículas han permitido confirmar la existencia de partículas que habían sido predichas de forma teórica y también completar el modelo estándar con la detección de partículas inesperadas.

Una fiesta de partículas

Durante el siglo XX, el mundo de la investigación de partículas subatómicas era como una fiesta a la que cada vez se iba sumando más gente, algunos invitados esperados y confirmados pero otros se presentaban sin invitación ni preaviso. Poco después del hallazgo del positrón se descubrió la otra partícula básica que forma el átomo, el neutrón. Antes de 1930 ya se sabía que el átomo está consti-

tuido por electrones que orbitan alrededor de un núcleo formado por protones, en el que se concentra la mayor parte de su masa. Por otro lado, se conocía el número de electrones que formaba cada tipo de átomo y que, al ser estos eléctricamente neutros, debían tener la misma cantidad de protones. Sin embargo, en ninguno de los átomos la cantidad esperada de protones era suficiente para justificar el total de la masa del núcleo, por lo que se suponía que en el núcleo también debía haber electrones para compensar el exceso de carga positiva que se hubiera detectado debido a los protones de más. Tal teoría no se ajustaba al modelo atómico que se estaba desarrollando.

> La realidad es compleja, pero esto no es justificación para todas las conclusiones precipitadas.
>
> HIDEKI YUKAWA

En 1930 se descubrió que había una partícula neutra —sin carga eléctrica— que forma parte de los núcleos atómicos. Dos años más tarde, el físico inglés James Chadwick se propuso determinar la masa de esta partícula neutra, que ya se conocía como neutrón. Mediante una serie de experimentos, detectó que la masa de la partícula era de 939,57 MeV, un valor muy cercano al medido luego con procedimietos más exactos, que es de 939,565 560 MeV.

Con el descubrimiento del neutrón, el modelo atómico quedó prácticamente explicado: los átomos se pasaron a describir como formados por un núcleo de protones y neutrones, rodeado por electrones orbitando a ciertos niveles energéticos permitidos. Los físicos pensaban que solo quedaba una única cuestión por resolver: ¿por qué los protones no se repelían desintegrando el núcleo? Lo que no esperaban era que la respuesta a este enigma no fuera el final sino solo el principio de la teoría física de partículas actual.

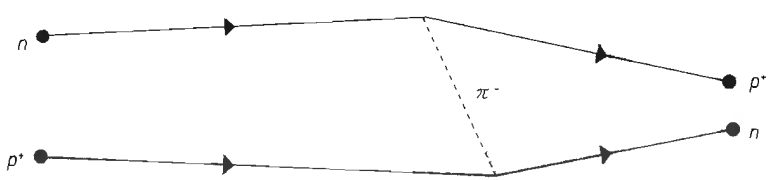
Para explicar la cohesión del núcleo se requería de la existencia de una fuerza entre protones más fuerte que la fuerza eléctrica. Ahora se sabe que la fuerza causante de esta unión es una de

las fuerzas fundamentales de la naturaleza: la denominada fuerza nuclear fuerte. El físico japonés Hideki Yukawa predijo que los protones y neutrones se mantenían unidos porque intercambiaban constantemente una partícula a la que llamó *pion* (π). Para ajustarse a las leyes de conservación de espín, masa y carga, la nueva partícula debía tener unas características concretas, que el mismo Yukawa se propuso averiguar. Para empezar, se dio cuenta de que debían existir dos partículas con tales propiedades, una con carga positiva, para transferir la carga de protones a neutrones y convertirlos en la otra partícula, y otra con carga negativa para llevar a cabo el proceso contrario (fig. 5).

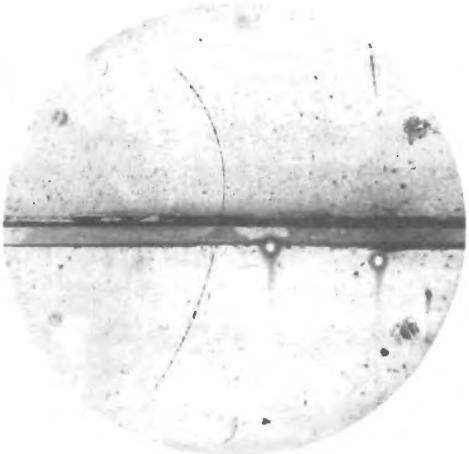
En 1935 Yukawa propuso que se debía buscar entre los rayos cósmicos una partícula cuya carga podía ser positiva o negativa, pero debía tener el mismo valor que la del electrón, espín 0, una masa intermedia entre las del protón y del electrón y con una vida media de 7×10^{-24} segundos.

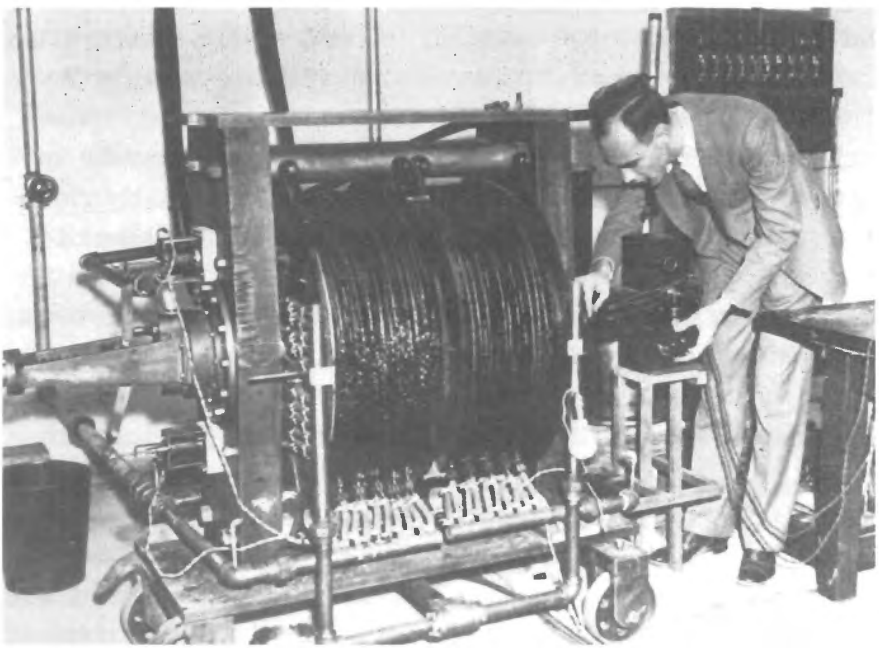
En 1937, Anderson, el descubridor del positrón, detectó una nueva partícula en los rayos cósmicos, cuya masa era unas 200 veces mayor que la del electrón. Se dio por supuesto, de forma errónea, que se trataba del pion de Yukawa: por definición, los piones deberían interactuar con la materia de forma extremadamente rápida,

Fig. 5



El diagrama de Feynman muestra cómo un pion con carga negativa puede ser transferido de un neutrón a un protón, con el resultado de que ambas partículas intercambian su naturaleza.





— El físico japonés Hideki Yukawa (arriba a la izquierda) predijo la existencia de una nueva partícula denominada pion. Fotografía de la traza de un positrón en una cámara de niebla (arriba a la derecha), obtenida por el físico estadounidense Carl David Anderson (abajo), retratado en el laboratorio Guggenheim Aeronautics con el dispositivo que le permitió detectar la primera antipartícula conocida.

ya que son las partículas causantes de la fuerza nuclear fuerte, por lo que hubiera sido complicado que consiguieran atravesar toda la atmósfera sin interactuar con otras partículas por el camino. Los físicos italianos Marcello Conversi y Oreste Piccioni se propusieron demostrar que la partícula descubierta por Anderson tenía que ser otra que no había sido predicha y en 1944 demostraron que su tiempo de vida, de aproximadamente 2×10^{-6} segundos, era muchos órdenes de magnitud superior al del pion. A esta nueva partícula inesperada, sobre la que nadie tenía muy claro el papel que interpreta en el modelo estándar, se la denominó muon (μ) y se ha descrito a veces como un electrón pesado.

Durante las décadas de 1940 y 1950 hubo grandes avances en las técnicas de detección de partículas, lo que permitió llenar la segunda mitad del siglo de sorpresas. En 1947 se descubrió una partícula con espín 0 y de masa aproximadamente 270 veces mayor que la del electrón. Además, la cantidad de estas partículas que se identificaban disminuía a medida que los detectores se acercaban a nivel del mar, donde no se detectaba ninguna, y se vio que cuando interaccionaba con núcleos hacía que se desprendieran varias partículas. Con estas pruebas, los científicos pudieron afirmar que la partícula estaba gobernada por la fuerza nuclear fuerte y, finalmente, se atrevieron a anunciar, esta vez sin error, que se había encontrado por fin el pion que predijo Yukawa.

La fuerza nuclear fuerte, que mantiene unidos protones y neutrones en el núcleo atómico, se describe, dentro del marco de la física de partículas, como el resultado del intercambio de piones entre estos nucleones. Para ello, fue necesario redefinir los protones y los neutrones como la misma partícula, un nucleón, que se encuentra en dos estados diferentes. Con este fin, se propuso una nueva propiedad intrínseca que debían tener todas las partículas, el isospín: los nucleones tienen un isospín que, en función de su estado, adopta uno de tres posibles valores: −1, 0 o +1. Los nucleones podrían cambiar su isospín absorbiendo o emitiendo

un pion. Esta teoría predecía, además, la existencia de un tercer nucleón.

La teoría del pion de Yukawa fue acogida con muchas reticencias por la comunidad científica, pero fue ganando aceptación a medida que se descubrían nuevas partículas que se adaptaban perfectamente a ella. Con la detección del muon y el pion en las cámaras de niebla, solo se había abierto un poco la puerta al mundo de las partículas: en 1955 ya se habían detectado muchas otras en las fotografías obtenidas de los rayos cósmicos, a las que se sumaban las creadas y detectadas en los aceleradores de partículas.

Dividir incluso los fragmentos

Cuanto más extenso se volvía el catálogo de partículas, más se complicaba el desarrollo de una teoría que consiguiera incluir a todas. En la década de 1960, la necesidad de encontrar un criterio de clasificación para agrupar partículas con propiedades similares era uno de los principales objetivos de la física subatómica. No era tarea fácil, ya que las clasificaciones que se manejaban diferían mucho dependiendo de las características en función de las cuales se establecían. Como resultado, convivieron varias clasificaciones heterogéneas.

La primera clasificación distingue entre leptones, muones y bariones, según la masa de partícula. Los leptones marcan el límite inferior, con masas entre 0 y 2 000 veces menores que la del protón, como es el caso del electrón. Después se encuentran los muones que, aunque son más masivos que los leptones, no llegan a alcanzar la masa del protón. Las más pesadas son los bariones, que incluyen el protón y todas las partículas más pesadas.

Una segunda clasificación tiene en cuenta el valor del espín de cada partícula, que puede ser fraccionario o entero: protones, neutrones y electrones tienen espín fraccionario 1/2, y se clasifican como

fermiones; por otro lado, los muones (un tipo de partículas entre las que se cuentan los piones) y el fotón tienen espín entero, 0 y 1, respectivamente, y entran dentro de la categoría de los bosones. Esta clasificación permitió evidenciar que todas las partículas que formaban la materia eran fermiones, mientras que las partículas portadoras de alguna fuerza eran bosones: el fotón es la partícula causante de la fuerza eléctrica y el pion, de la fuerza nuclear.

Estos dos criterios no llevaron a ningún patrón que permitiera desarrollar un nuevo modelo teórico unificado. Por ese motivo, se optó por establecer una nueva clasificación, basada en las formas de la interacción nuclear de las partículas. En los resultados experimentales se pudo observar que hay partículas que solo participan en interacciones intensas, otras solo en interacciones de menor intensidad y algunas lo hacen en ambas. A partir de estos resultados, se estableció la distinción entre la fuerza nuclear fuerte y la fuerza nuclear débil.

Sin embargo, la forma de interactuar de algunas partículas se convirtió en todo un misterio para la comunidad científica ya que no parecía seguir ningún patrón ni lógica acorde con sus características. Para resolverlo, el físico teórico Murray Gell-Mann ideó una nueva clasificación de partículas que seguía una característica propuesta por él mismo: la extrañeza, que divide las partículas entre extrañas y normales. Su nueva teoría no acababa aquí: si la extrañeza se ha de considerar una verdadera propiedad de las partículas, también se debe poder asignar un valor para cada partícula, como para la masa, la carga eléctrica, el espín y el isospín. Así que se desarrolló un criterio, bastante complejo, para asignar valores a la extrañeza: si una partícula se considera normal, como el protón, su extrañeza es 0; por otro lado, si una partícula extraña decae en una partícula normal su extrañeza es −1, mientras que si decae en una antipartícula normal, adopta el valor +1.

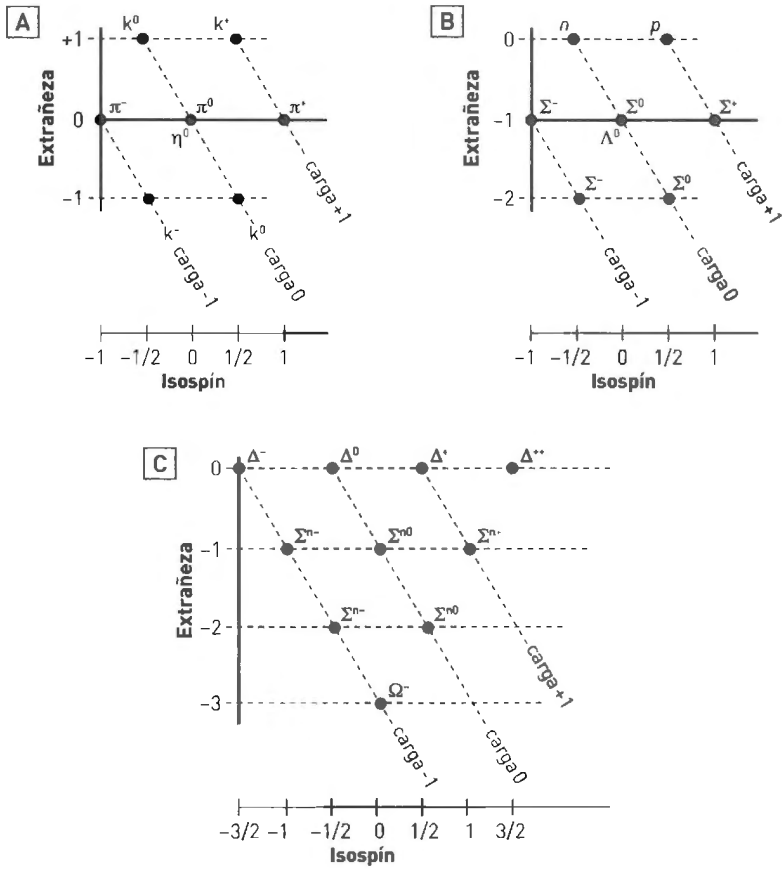
Siguiendo con el objetivo de buscar patrones entre las partículas, Gell-Mann creó unos diagramas (fig. 6) en los que situaba cada

> UN ESPECIALISTA EN LO MUY PEQUEÑO

Murray Gell-Mann (Nueva York, 1929) empezó sus estudios superiores en la Universidad de Yale con tan solo quince años de edad. A los diecinueve se licenció en física y se trasladó al Instituto de Tecnología de Massachusets (MIT) para cursar un doctorado. Su tesis marcó el inicio de una larga carrera profesional, centrada en el estudio de las partículas subatómicas. Poco después se unió al grupo del Instituto de Estudios Nucleares de la Universidad de Chicago y finalmente se integró en el Instituto tecnológico de California (Caltech), donde en 1967 se le concedió la cátedra Millikan de física teórica. Gracias a aportaciones como una nueva clasificación de las partículas, la predicción de la partícula omega negativa y la de los quarks, Gell-Mann está considerado una de las figuras más destacadas de la física de partículas y uno de los mayores contribuyentes al desarrollo del modelo estándar. En 1969 fue galardonado con el premio Nobel de Física. Además de su labor investigadora, ha escrito obras de divulgación, como *El quark y el jaguar: aventuras en lo simple y lo complejo*.

— Murray Gell-Mann (izquierda) junto al investigador John Seely Brown.

Fig. 6



Los diagramas de Gell-Mann muestran la disposición de los mesones (**A**), de los bariones (**B**) y de otras partículas (**C**).

una de ellas sobre un sistema de coordenadas, con el isospín en el eje de abscisas y la extrañeza en el de ordenadas. Los resultados del procedimiento mostraron que, efectivamente, las partículas se disponen siguiendo determinados patrones: los mesones más ligeros, por ejemplo, forman un hexágono regular con dos partículas en su

centro (A), un patrón idéntico al formado por los bariones más ligeros (B). Por otro lado, hay partículas que no se pueden colocar formando hexágonos, sino que siguen otras formas geométricas, como un triángulo (C). En este último caso, no se podían rellenar todos los posibles espacios del triángulo con las partículas conocidas hasta entonces, lo que llevó a predecir de forma teórica la existencia de las nuevas partículas que debían rellenar estos vacíos. Una vez más, las predicciones resultaron acertadas y las partículas con tales propiedades se llegaron a detectar más adelante de forma experimental.

A pesar de la belleza de los diagramas conseguidos, no fue con ellos con los que Gell-Mann hizo uno de los descubrimientos más importantes del siglo XX: el físico estadounidense se dio cuenta de que no existía la configuración más simple de todas, un triángulo con una partícula en cada vértice, y razonó que tales partículas debían existir, ya que la naturaleza siempre tiende a los sistemas más sencillos. En consecuencia, predijo la existencia de tres partículas a las que llamó quarks, más concretamente el quark arriba, quark abajo y quark extraño, con cargas de 2/3, −1/3, −1/3 e isospines de 1/2, −1/2 y 0, respectivamente.

Las partículas fundamentales de las partículas fundamentales

El nuevo modelo puso de manifiesto que es imposible encontrar los quarks de forma individual o en pares, sino que siempre tienen que ir en tríos. Cada combinación posible de una terna de quarks forma un barión en concreto. Los protones, por ejemplo, se forman con dos quarks arriba, con carga 2/3, y uno abajo, con carga −1/3, de modo que la carga total es:

$$\frac{2}{3}+\frac{2}{3}-\frac{1}{3}=\frac{3}{3}=1$$

Por otro lado, el neutrón está formado por un quark arriba y dos abajo, por lo que es una partícula neutra:

$$\frac{2}{3}-\frac{1}{3}-\frac{1}{3}=0$$

Aparte de en tríos, otra forma de encontrar los quarks es junto a un antiquark, que no puede ser su propio antiquark ya que se aniquilarían. La partícula resultante de esta unión es un mesón, por ejemplo, el pion positivo se forma por un quark arriba y un antiquark abajo. Finalmente, los leptones, entre los que se cuentan los electrones y los neutrinos, son partículas fundamentales y no están formadas por quarks.

Otro de los grandes éxitos de este modelo es la explicación de las características invertidas de la antimateria: los antimesones y antibariones están formados por los antiquarks correspondientes. En el caso del antiprotón, formado por dos antiquarks arriba y un antiquark abajo, es fácil demostrar que el valor de la carga será el mismo, pero con el signo opuesto:

$$-\frac{2}{3}-\frac{2}{3}-\frac{1}{3}=-\frac{3}{3}=-1$$

En el caso del antineutrón, en el que la carga total de su antipartícula sigue siendo neutra, el hecho de que los antiquarks que lo forman tengan la carga invertida respecto a los quarks que forman el neutrón explica que el momento magnético también esté orientado en dirección contraria.

El modelo de los quarks parece adecuarse a la perfección a las propiedades de las partículas subatómicas y también a sus interacciones. Además, a medida que se han obtenido nuevos resultados experimentales, se han podido explicar manteniendo el mismo modelo mejorado. Actualmente se reconocen hasta 6 tipos de quarks con sus correspondientes antiquarks, que se definen a partir de nuevas propiedades, conocidas por nombres como *cima* o *encanto*.

> LA PARTÍCULA DE LA GRAVEDAD

El gravitón es una partícula hipotética, la causante de la transmisión de la fuerza gravitatoria. Según las predicciones teóricas, el valor de su espín tiene que ser 2, por lo que su comportamiento será del tipo bosónico. Su masa puede tener cualquier valor entre 0 y $1{,}6 \times 10^{-69}$ kg. Una de las razones que los científicos aducen para explicar el hecho de que aún no se hayan detectado gravitones es que después de crearse desaparecen con gran rapidez en dimensiones tan pequeñas que no somos capaces de detectarlas, dejando tan solo un espacio vacío que se detecta como un desajuste del balance de energía y momento. Es necesario poder estudiar muy detalladamente y comprender con exactitud las propiedades del objeto que falta para poder afirmar que es un gravitón y no confundirlo con otras cosas. Los experimentos ATLAS y CMS del CERN intentan detectar posibles formas de decaimiento del gravitón.

— Instalaciones subterráneas del detector del experimento ATLAS, durante su construcción.

El modelo estándar de las partículas fundamentales empieza con la unión de la física relativista y la mecánica cuántica y, aunque sigue evolucionando, ha llegado a explicar no solo la física de partículas sino casi todas las interacciones del universo. Ha resultado un marco teórico de gran éxito, con predicciones confirmadas como la de la existencia del bosón de Higgs.

Sin embargo, este modelo aún tiene algunos cabos sueltos. Uno de los más importantes es que, mientras puede explicar la fuerza electromagnética, la nuclear fuerte y la nuclear débil, aún es incapaz de explicar la fuerza de gravedad, que dependería de una partícula aún no detectada, conocida como gravitón. Así, para completar el modelo estándar y el papel de la antimateria, resulta imprescindible remontarse a los orígenes del universo, al Big Bang, cuando las cuatro fuerzas estaban unificadas, y examinar cómo se diferenciaron en su evolución posterior.

03

¿DÓNDE ESTÁ LA ANTIMATERIA?

Nuestro universo no ha sido ni será siempre como lo conocemos ahora. Todo empezó con el Big Bang, cuando nació el tiempo, se creó la materia y con ello las leyes de la física. Unas leyes que hace falta entender para llegar a explicar el universo actual, su origen, la asimetría entre materia y antimateria y el camino que ha conducido hasta nuestra existencia.

El estado actual del universo, desde la disposición de las galaxias hasta la existencia del último de los seres vivos, se debe a una serie de hechos, casualidades y accidentes sucesivos. Tan solo una mínima diferencia, como un meteorito que no se hubiera estrellado contra la Tierra y no hubiera extinguido a los dinosaurios, podría haber cambiado la historia del planeta por completo. Más decisivo aún: si por cada mil millones de antipartículas no hubiera habido mil millones y una partícula de materia, el universo no sería más que pura radiación. Gracias a esta pequeña asimetría, el universo, es decir, la totalidad del espacio y del tiempo que contiene toda la materia y la energía existentes, tiene planetas, estrellas y galaxias formadas por la materia que conocemos.

Las primeras civilizaciones humanas ya mostraron interés por el estudio del universo e intentaron saber cómo era, cómo se formó, hasta dónde se extendía... A lo largo de la historia, el recurso a la acción creadora de las divinidades dio respuesta a las mayores incógnitas de la naturaleza. Cuando Isaac Newton describió la ley de la gravitación universal, que permitió dar razón de los movimientos

de los cuerpos celestes, se encontró con un problema: no podía explicar por qué los astros, distribuidos según el concepto de su época en un tiempo y un espacio infinitos, no colapsaban atraídos por la fuerza de la gravedad que ejercían entre ellos. Después de buscar una respuesta científica, tuvo que resignarse a pensar que era la mano de Dios la que de vez en cuando se ocupaba de volver a poner los cuerpos en su lugar correspondiente.

Durante el siglo XX, los científicos realizaron importantes avances en cosmología, llegando a desarrollar varios modelos sobre el universo y su configuración. La teoría más ampliamente aceptada entre la comunidad científica, que cuenta con numerosas pruebas experimentales que la apoyan, es la teoría del Big Bang, o de la Gran Explosión, que sostiene que el tiempo tuvo un principio y que el universo está en constante evolución.

No es un modelo completo y cerrado, ya que quedan muchas cuestiones por responder como, por ejemplo, qué pasó en los instantes inmediatos después del Big Bang o cómo morirá el universo. El estudio de la física de partículas ha sido de gran importancia para llegar a desarrollar tal teoría. En laboratorios de todo el mundo se analizan las propiedades de la antimateria y su interacción con la materia común para poder dar con las respuestas aún sin hallar, y así ser capaces de entender todas las etapas de la evolución del universo desde su primer instante.

EL INICIO DE TODO LO CONOCIDO Y DESCONOCIDO

Hay consenso en que el universo nació hace unos 13800 millones de años. Para poder tener una idea aproximada de la escala de tiempo que esto representa, comprimamos su edad en un solo año, al que llamaremos el año cósmico. Entonces, el Big Bang tuvo lugar el 1 de enero a las 00:00 horas, y el instante en el que nos encontramos ahora, el presente, es la medianoche del 31 de diciembre.

En esta escala, cada mes representa más de 1 000 millones de años y cada día casi 40 millones. La primera estrella nació el 10 de enero y las primeras galaxias se formaron solo tres días más tarde. Nuestra galaxia, la Vía Láctea, se formó hace once mil millones de años, lo que es equivalente al 15 de marzo en el año cósmico. El Sol se encendió el día 31 de agosto y la vida en la Tierra empezó el 21 de septiembre, hace 3500 millones de años. A las 6 horas y 24 minutos de la mañana del 30 de diciembre, un asteroide impactó contra la tierra extinguiendo a los dinosaurios. Los humanos evolucionamos solo en la última hora del último día del calendario cósmico: la historia registrada al completo, todas las civilizaciones y personajes históricos que conocemos, han existido solo en el lapso de los últimos 14 segundos antes de la medianoche de este metafórico último día.

En el momento del Big Bang, el universo era infinitamente caliente y denso. A partir del Big Bang, el universo empezó a expandirse, al mismo tiempo que su temperatura y su densidad empezaron a disminuir. Hay que evitar pensar que el Big Bang fuera una explosión: no fue como una bomba que de repente desprende mucha energía y crea el universo, sino que fue el inicio del espacio mismo. El universo no tiene ni centro ni límites, y por tanto no se puede considerar que estos se expandan, sino que es el propio espacio el que se expande.

El Big Bang también fue el origen del tiempo. Esto significa que, si se pudiera viajar hacia el pasado, lo más lejos que se podría retroceder sería hasta el momento del Big Bang: no tendría sentido intentar viajar más atrás ya que esos momentos no existen, de la misma forma como no tiene ningún sentido intentar viajar a un punto más al sur que el polo sur.

Cuando se hacen referencias a un universo finito y a la expansión de sus límites muchas veces la ciencia se refiere no al universo en su totalidad, sino solo al universo observable, cuyo volumen es de $1{,}09 \times 10^{79}$ m^3 y que contiene $9{,}27 \times 10^{52}$ kg de masa. El motivo por

el cual solo se puede observar una pequeña porción del universo es porque la imagen viaja a una velocidad finita, de modo que la imagen de una gran parte del universo no ha tenido tiempo de llegar a la Tierra. Al recibir luz de objetos muy lejanos, en realidad lo que se observa es cómo eran estos en el pasado, no cómo son en la actualidad: si se observa, por ejemplo, una estrella que se encuentra a 1000 años luz significa que la radiación que ahora llega hasta nosotros salió de la estrella hace 1000 años, de manera que nos da información sobre cómo era en aquel entonces.

Podemos realizar observaciones hasta una distancia de 45000 millones de años luz, lo que nos ha permitido obtener información sobre el pasado del universo visible. Más allá de este radio es de suponer que haya otras galaxias de las que nunca se han recibido fotones, pero el espacio que las separa de la Vía Láctea se expande tan rápidamente que la luz no tiene tiempo suficiente para llegar hasta nuestro planeta. Hoy en día sabemos que, aunque el universo no tiene centro, sí somos el centro del universo observable, ya que podemos llegar a observar la misma distancia en todas las direcciones.

En el momento inicial del Big Bang (no en el previo), toda la energía y materia del universo observable se encontraba concentrada en un punto diminuto del espacio. Entonces empezó la expansión, y durante un brevísimo lapso de tiempo de 10^{-43} segundos, conocido como la Era de Planck, el comportamiento del universo estuvo regido por unas leyes físicas que aún no se conocen.

Al comienzo, solo existía una fuerza unificada que gobernaba todas las interacciones. La primera en separarse fue la de la gravedad, responsable de atraer la materia entre sí. Las otras tres fuerzas se mantuvieron unidas hasta que el universo tenía 10^{-35} segundos, cuando se dividieron entre la nuclear fuerte, gracias a la cual los núcleos atómicos se mantienen unidos, y la electrodébil. Finalmente, esta última se escindió entre las fuerzas electromagnética y nuclear débil, las causantes de las interacciones

electromagnéticas entre partículas y de los decaimientos de los núcleos radiactivos, respectivamente, configurándose las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza, ya que no se conoce ninguna otra fuerza más simple que las pueda explicar.

Pasados 10^{-12} s, el universo era una sopa de materia, antimateria y energía. Su temperatura era tan elevada que los fotones se convertían espontáneamente en pares de partículas y antipartículas, que se aniquilaban casi al instante para dar lugar a nuevos fotones. La expansión y el enfriamiento del universo continuaron y al cabo de una millonésima parte de segundo, la energía ya había dejado de ser suficiente para provocar esta reacción espontánea. Se supone que en aquel momento se pusieron de manifiesto los efectos de la pequeña asimetría que marcó el destino del cosmos: por cada 4000 millones de antipartículas había 4000 millones y una partícula. La gran mayoría de partículas encontraron una antipartícula con la que aniquilarse, dejando tan solo radiación como rastro, pero hubo una fracción relativamente pequeña que no se aniquiló, suficiente para formar toda la materia que hay hoy en día en el universo.

Todavía no se conocen con certeza los motivos que causaron esta asimetría, por lo que se siguen estudiando las propiedades de la antimateria. Durante un tiempo, se consideró la posibilidad de que tan solo hubiera sido un accidente, una casualidad o un error de la naturaleza. Sin embargo, en las últimas décadas varios experimentos han confirmado que existen diferencias muy sutiles entre algunas partículas y sus antipartículas, lo que permite pensar que en realidad la naturaleza tiene una predilección por la materia frente a la antimateria. De momento, ninguna de estas diferencias parece ser suficiente para provocar tal asimetría, pero científicos de todo el mundo usan los grandes aceleradores de partículas, como el LHC del CERN, para crear antimateria y poner a prueba las predicciones teóricas. De hecho, en el CERN, hay un experimento orientado únicamente a este fin, el LHCb.

Cómo se impuso la materia

El proceso por el cual se produjo la ruptura de simetría entre la cantidad de materia y la de antimateria se conoce como bariogénesis, ya que se rompió la simetría de bariones, un tipo de partículas subatómicas, como los protones y neutrones, formadas por tres quarks, unas partículas aún menores. Existen varias teorías sobre los motivos de la bariogénesis: de momento, se está intentando descubrir si las razones por la que se produjo tienen cabida dentro del modelo estándar de la física de partículas o si, por el contrario, se deben explicar en otro marco teórico, como el de la supersimetría o conforme a la llamada *teoría de gran unificación* (GUT, por sus siglas en inglés).

La teoría más aceptada, aunque no demostrada todavía, explica la asimetría entre el número de bariones como consecuencia de que las probabilidades de desintegración de una partícula y su antipartícula son diferentes. Supongamos, por ejemplo, que una partícula hipotética X se puede desintegrar de las dos formas siguientes:

$$X \rightarrow u + u$$
$$X \rightarrow e^{+} + \bar{d}$$

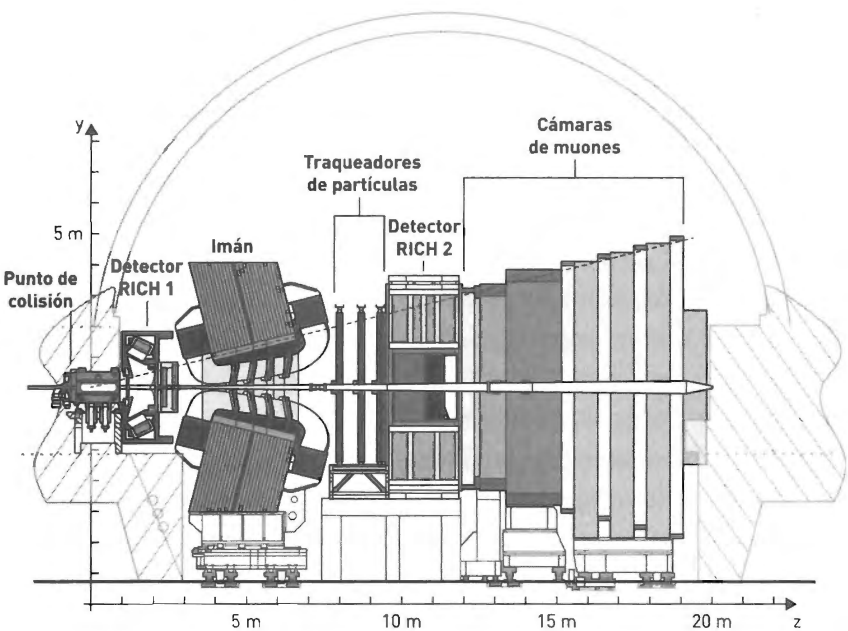
Donde u es una partícula, y e^{+} y $\bar{d}$ son antipartículas. Entonces, existirá una antipartícula de X ($\bar{X}$) cuyas dos formas de desintegración serán las antipartículas correspondientes a las de las reacciones anteriores, en este caso las antipartículas de u ($\bar{u}$), y las de e^{+} y $\bar{d}$, que resultan ser las partículas e^{-} y d. Las desintegraciones, en este caso, serán:

$$\bar{X} \rightarrow \bar{u} + \bar{u}$$
$$\bar{X} \rightarrow e^{-} + d$$

En ambos casos hay un modo de desintegración que resulta solo en materia y el otro solo en antimateria. De modo que si la probabilidad con la que ocurre cada desintegración es diferente en partí-

> UN DETECTOR PARA DIFERENCIAS MINÚSCULAS

El LHCb (gran colisionador de hadrones belleza) es uno de los experimentos que se llevan a cabo en el LHC. El conjunto de sus detectores, de 21 metros de longitud, 10 de altura y 13 de anchura, se encuentra a 100 metros bajo tierra, con el primer subdetector cerca del punto donde se forman los pares partícula-antipartícula, y capta las partículas lanzadas en una sola dirección. Tiene por objetivo estudiar las pequeñas diferencias entre materia y antimateria. Para ello, se centra en el estudio del llamado *beauty quark* (quark belleza) o *b quark*. Los resultados obtenidos han detectado indicios significativos de ruptura en la simetría entre materia y antimateria, algunos de los cuales pueden ser de gran importancia para explicar las razones del dominio de la materia en el universo.



— Sección transversal del túnel del LHC, con los detectores del experimento LHCb para la identificación de las partículas resultantes de la colisión entre hadrones.

culas y antipartículas, quedará un exceso de materia o antimateria. Por ejemplo, si la primera forma de desintegración ocurre un 51 % de las veces en la materia y un 50 % de las veces en la antimateria, habrá partículas u que no encontrarán una antipartícula $\bar{u}$ con la que aniquilarse. Además, la segunda forma de desintegración de la antimateria, que tiene como producto solo materia, también ocurrirá el 50 % de las veces, mientras que la de sus antipartículas correspondientes solo lo hará en un 49 % de los casos. El resultado después de las aniquilaciones correspondientes sería un exceso de partículas u, d y e^-. Aún no se ha descubierto una partícula que cumpla estas condiciones, aunque se le atribuye este hecho a una partícula teórica denominada X-bosón, que se concibe dentro del marco de la GUT.

Poco se sabe con seguridad de los procesos físicos que tuvieron lugar durante los primeros instantes del universo. Al cumplir el primer segundo de vida, las fuerzas fundamentales de la naturaleza se habrían separado, se habría producido la ruptura de simetría entre materia y antimateria y el universo ya había alcanzado unos pocos años luz de tamaño. Aún tenía suficiente energía para crear electrones y positrones, hasta que finalmente solo sobrevivió uno de cada mil millones de electrones, quedando un electrón por cada protón. A medida que el universo se fue enfriando los protones empezaron a unirse con otros protones y con neutrones, creando los núcleos de los primeros elementos químicos, el hidrógeno y el helio.

Desde dos minutos después del Big Bang hasta al cabo de 380 000 años poco pasó más allá de la continua expansión y enfriamiento. Fue una época de libertad para los electrones, que aún no se encontraban ligados a ningún núcleo atómico y se podían mover sin restricciones. Esta libertad llegó a su fin cuando la temperatura bajó de los 3 000 K, aproximadamente la mitad de la temperatura de la superficie del Sol, momento en que los electrones libres dejaron de tener suficiente energía para escapar de los núcleos atómicos y se ligaron a ellos.

El universo siguió expandiéndose y llegó el momento en que la fuerza de la gravedad tuvo la oportunidad de empezar su trabajo. La materia empezó a agruparse debido a la atracción entre sus masas, creando estrellas y galaxias. Las estrellas tenían suficiente presión y temperatura para crear otros elementos químicos en su interior, más pesados que el hidrógeno y el helio, que al explotar las estrellas muy masivas, convertidas en supernovas al final de su ciclo de vida, se esparcieron por el espacio, quedando disponibles para fomar nuevas estructuras, como los planetas.

> Si hubiese sido ya descubierta la expansión del universo, jamás habría llegado a la introducción de la constante cosmológica.
>
> ALBERT EINSTEIN

Los rastros de la mayor explosión imaginable

La teoría del Big Bang está ampliamente aceptada por la comunidad científica. No siempre fue así, ya que su aceptación implicaba tener que redefinir el conocimiento que se daba por cierto y, aunque aún no se puede probar con absoluta certeza, hay varias evidencias experimentales que la respaldan con gran fuerza.

Antes de la teoría del Big Bang, el universo se concebía como estable y sin cambios en una escala cósmica. Tan inculcada estaba esta idea que el mismo Albert Einstein, cuando obtuvo evidencias matemáticas de la expansión del universo, introdujo una constante en sus ecuaciones (la llamada *constante cosmológica*) para que sus soluciones tuvieran sentido en un universo estable. En 1922 el físico soviético Alexander Friedmann publicó unas soluciones a las ecuaciones de Einstein en las que se consideraba un universo en expansión, pero, aunque Einstein pensó que era una propuesta original e interesante, no le hizo mucho caso, como tampoco hizo el resto de la comunidad científica. Sin embargo, Friedmann solo tuvo que esperar nueve años

a que el astrónomo Edwin Hubble demostrara con pruebas experimentales que el universo se encuentra en un proceso de continua expansión. Cuando Albert Einstein se enteró de este descubrimiento, reconoció haber cometido el mayor error de su carrera.

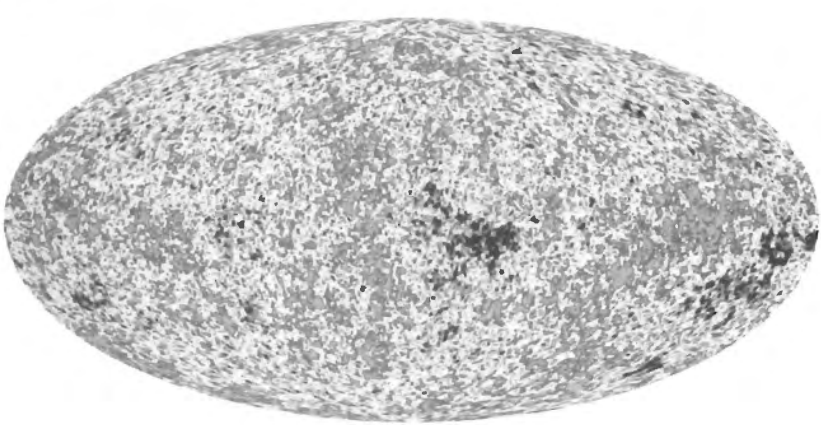
La expansión del universo fue una prueba clave para que la teoría del Big Bang se empezara a aceptar, ya que si este se encontraba en expansión debía existir un momento en el que esta comenzara, y este momento solo podía ser lo que ahora se conoce como Big Bang. Esta denominación fue acuñada por el físico británico Fred Hoyle, un ferviente defensor de la teoría del universo estable, que usó esta expresión en un programa radiofónico, en un intento de menospreciar la teoría rival. El modelo del Big Bang tenía muchas otras implicaciones además de dar cuenta de la expansión del universo, así que durante algunos años siguió siendo considerada una propuesta teórica entre varias otras.

En 1948, George Gamow, Ralph Alpher y Robert Herman predijeron de forma teórica la existencia de una radiación de fondo del universo como consecuencia del Big Bang: según sus cálculos, una vez el universo alcanzó los 3000 K de temperatura, los fotones ya no tuvieron energía suficiente para ionizar átomos de hidrógeno ni crear pares electrón-positrón, permaneciendo en forma de radiación. Gamow y sus colegas predijeron que como el universo no tiene límites, esta radiación provendría de todas direcciones, que la temperatura de estos fotones habría decaído desde los 3000 K hasta los 5 K, por lo que habría pasado a ser una radiación de microondas. La predicción de la radiación de fondo de microondas no se tuvo en cuenta hasta que en 1964 Arno Penzias y Robert Wilson investigaron si era posible usar radiación de microondas para comunicarse con satélites. En sus experimentos, detectaron unas interferencias provenientes de todas las direcciones del espacio, que se reconocieron como la radiación de fondo del universo, el rastro del Big Bang. Según las pimeras estimaciones, la temperatura asociada a esta radiación era de 3,5 K, no muy lejos del valor estimado

por el equipo de Gamow, aunque luego se ha medido con mayor precisión y se ha determinado que es de 2,725 K. Con este descubrimiento, la resistencia de los más escépticos desapareció y se aceptó que la teoría del Big Bang era correcta. Desde 2001 la sonda WMAP examina el firmamento para elaborar un mapa de la distribución de la radiación de fondo, que proporcione una imagen precisa de los principios del universo (fig. 1).

Otra prueba concluyente favorable al modelo del Big Bang es su predicción de que en el universo debería haber 12 núcleos de hidrógeno por cada núcleo de helio, y 40 000 por cada núcleo de deuterio —formado por un protón y un neutrón— , unos valores que se corresponden exactamente con lo que se observa: en el universo, un 90% de los átomos son hidrógeno, un 8% helio y el 2% restante pertenece al conjunto de los otros elementos de la tabla periódica, que se siguen formando a partir de protones y neutrones en el interior de las estrellas, en un proceso denominado nucleosíntesis.

Fig. 1



Las zonas oscuras en el mapa de la radiación de fondo de microondas corresponden a regiones del espacio con una temperatura menor que la media, en las que la densidad de materia y energía es más reducida.

EL UNIVERSO ANTE NUESTROS OJOS

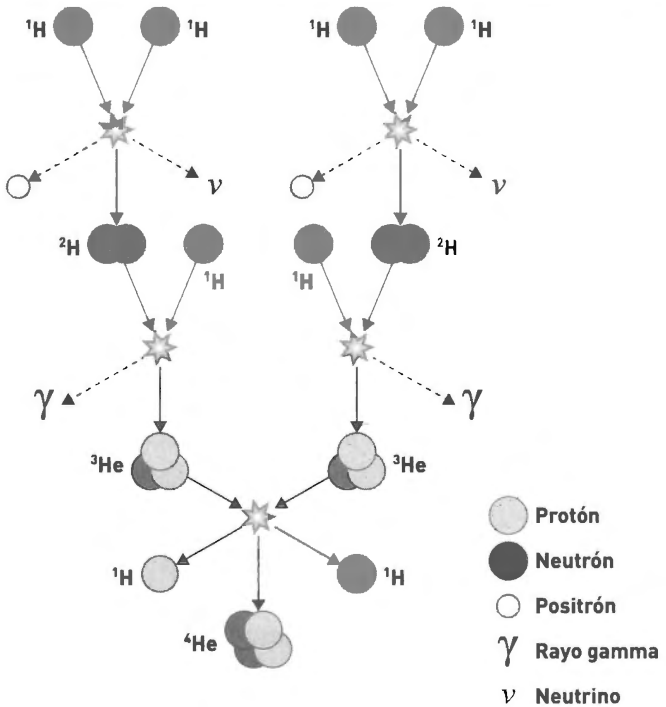
El universo que conocemos está formado por galaxias, agrupaciones de estrellas, gas y polvo ligados por la atracción gravitatoria. Las primeras estrellas se formaron a partir de la agrupación de átomos de hidrógeno reunidos y comprimidos por la gravedad, aumentando así su temperatura y su energía. Al igual que el universo, estos objetos estelares se encuentran en constante evolución: nacen, viven y mueren. Cuando la estrella está formada, la temperatura en su centro aumenta tanto que los electrones son arrancados de los átomos, dejando solo el núcleo. Los protones, que normalmente se repelen debido a su carga eléctrica, cuando se encuentran a 10 millones de kelvins se mueven a velocidades que les permiten acercarse lo suficiente para que la fuerza nuclear fuerte los mantenga unidos. Como los sistemas físicos siempre tienden a buscar la configuración más estable bajo las condiciones en las que se encuentran, cuando dos protones se unen a esta temperatura uno de ellos se convierte espontáneamente en un neutrón, creando un núcleo de deuterio (protón y neutrón), emitiendo su carga positiva en forma de un positrón, un neutrino, cuya carga es nula, y desprendiendo energía.

La formación de núcleos de deuterio es tan solo el punto de partida de la creación de elementos dentro de las estrellas. Los protones empiezan a interaccionar con el deuterio y, con dos protones y un neutrón, se forman los núcleos de helio. Cuando dos núcleos de helio interaccionan forman otro núcleo con dos neutrones, que es más estable, y liberan dos nuevos protones, según el esquema de la figura 2. Llega un momento en el que el hidrógeno en el astro se acaba y el único resto que deja es un envoltorio exterior alrededor de toda la estrella; entonces, si la estrella tiene suficiente masa, seguirá la cadena de reacciones formando progresivamente berilio, carbono, neón, oxígeno, silicio y finalmente hierro y níquel. El hierro es el elemento más estable, por lo que no se siguen formando

elementos más pesados después de este, y es el que acaba predominando en el núcleo de las estrellas más masivas.

No todas las estrellas se formaron con la misma cantidad de materia, por lo que no tienen la misma masa y no todas pueden llegar a sintetizar los mismos elementos antes de que se agoten sus reservas. Por ejemplo, si la temperatura de una estrella cuando se le agota el hidrógeno no es suficiente para sintetizar carbono a partir del helio, no podrá seguir con la cadena y morirá dejando

Fig. 2



La fuente de energía de las estrellas son las reacciones nucleares de fusión, en las que se forman átomos cada vez más complejos. En este proceso, además de nucleones (positrones y neutrones), intervienen positrones (antimateria), neutrinos y energía en forma de rayos gamma.

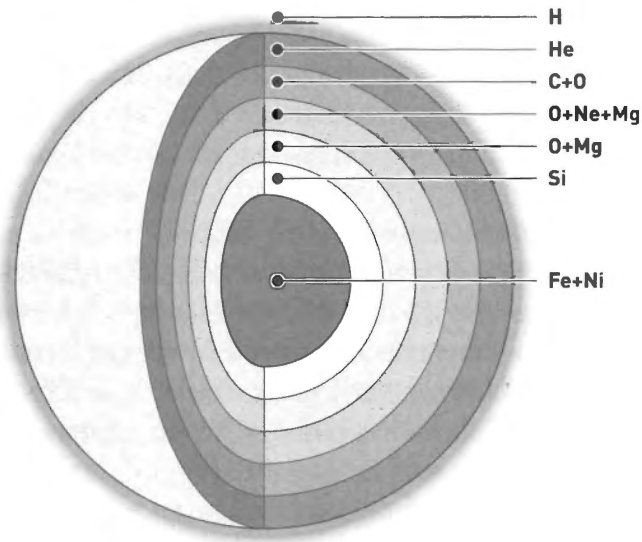
un núcleo estelar compuesto de helio. Las estrellas más masivas pueden sintetizar todos los elementos hasta el hierro, acabando su ciclo con la adquisición de una estructura interna definida por capas de distintos elementos, como se muestra en la figura 3.

La minoría de estrellas que son capaces de sintetizar hierro en su interior pueden llegar a sufrir un colapso gravitatorio, cuando esta fuerza de atracción deja de compensarse por la energía irradiada durante la nucleosíntesis. La estrella sigue contrayéndose hasta que las partículas del núcleo ejercen tanta presión hacia el exterior que la estrella explota y muere, dando lugar a una supernova. En esa explosión tienen lugar una serie de reacciones que son las causantes de formar los elementos más pesados que el hierro que se encuentran en el universo.

Las estrellas no tan masivas mueren cuando el núcleo ya no alcanza una temperatura suficiente para crear nuevos elementos y la gravedad no es suficiente para mantener las capas más externas de la estrella, que empiezan a expandirse. Este proceso tiene como consecuencia que la temperatura de la estrella disminuya progresivamente y el color de la estrella se vaya volviendo rojizo, dando lugar a lo que se conoce como una gigante roja. La evolución de cada estrella depende de su masa inicial, que llega a determinar el remanente estelar, es decir, la estructura del núcleo que deja después de su muerte, que puede acabar como una enana blanca, una estrella de neutrones o un agujero negro.

Sin embargo, la materia que forma parte de las estrellas tan solo suma el 5% de la del universo: el resto está formado por un 27% de materia oscura y un 68% de energía oscura. La materia oscura no interacciona con la radiación electromagnética, es decir, ni absorbe, ni refleja, ni emite luz de ningún tipo, lo que imposibilita su observación directa. Su existencia se conoce por los efectos gravitatorios que tiene sobre la materia que sí podemos ver: con solo la materia observable no se podría explicar que las galaxias se mantengan unidas formando *clusters*, que sin este componente debe-

Fig. 3



Los elementos de una estrella muy masiva que ha llegado a obtener hierro y níquel en su centro se distribuyen formando la secuencia de capas representada en este esquema.

rían haberse disgregado hace tiempo, ni tampoco explica la rapidez con la que giran las galaxias. Por eso, los cosmólogos han llegado a la conclusión de que debe haber materia de un tipo diferente al habitual, diferente incluso de la antimateria. Muy poco se sabe aún de la materia oscura, que como la antimateria, representa un sujeto de investigación muy importante.

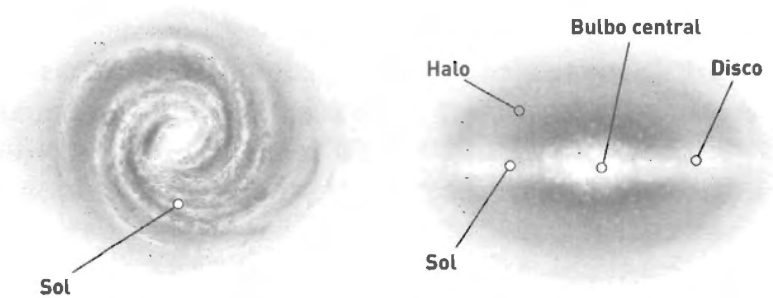
Sin embargo, el principal componente del universo es la energía oscura, asociada al vacío. Se supone que se encuentra repartida de forma homogénea en el espacio y el tiempo, lo que significa que su densidad no disminuye a medida que el universo se expande. Por este motivo no tendría efectos gravitacionales locales, más bien lo contrario: según algunas teorías, ejercería una fuerza repulsiva que aceleraría la expansión del universo.

Nuestro lugar entre las estrellas

Entre la inmensidad formada por la materia y la energía, comunes y oscuras, la Tierra se encuentra en uno de los brazos espirales de una galaxia, llamada Vía Láctea, a unos 28 000 años luz de su centro (fig. 4).

El Sol se formó hace unos 4 500 millones de años y está compuesto en su mayor parte por hidrógeno. Es una estrella muy común: su masa, equivalente a casi 333 000 veces la de la Tierra, le proporcionará energía suficiente para llegar a formar núcleos de carbono y oxígeno en su centro antes de morir. Durante los próximos 7 500 millones de años el Sol continuará fusionando elementos hasta que se agoten sus reservas y cuando acabe la nucleosíntesis en su interior su núcleo se contraerá, sin que la gravedad sea suficiente para retener las capas exteriores de hidrógeno y helio, las cuales se expandirán convirtiendo a nuestro astro rey en una gigante roja tan grande como para contener en su interior las órbitas actuales de Mercurio, de Venus y posiblemente la de la Tierra. Esta expansión durará unos

Fig. 4



La posición de nuestro sistema solar indicada en las vistas cenital y lateral de la Vía Láctea. Se puede observar que se encuentra muy lejos de su centro.

1000 millones de años, hasta desprenderse de todo su envoltorio, y donde una vez hubo el Sol solo quedará su núcleo, una enana blanca de carbono y oxígeno que poco a poco dejará de brillar.

¿Cuál será el futuro del universo?

Nuestro Sol morirá, como todas las estrellas en el universo, pero este seguirá evolucionando más allá de la vida de los cuerpos que lo forman. Cómo evolucionará, en qué se convertirá, o qué pasará al final o incluso si habrá un final, son preguntas a las que se espera que responda la ciencia.

Una de las teorías de mayor aceptación entre la comunidad científica afirma que cuando el universo llegue a los 850 000 millones de años de edad se habrá enfriado hasta estabilizarse en una temperatura constante casi nula. Puesto que a medida que el universo se expande los objetos de su interior se separan cada vez más y la densidad de materia baja, es de suponer que llegará un día en que la atracción gravitatoria no sea la fuerza dominante, sino la energía oscura, que ejerce una fuerza repulsiva y se mantiene constante en el vacío. De esta manera, el universo acabaría en una expansión eterna sin límite.

De ser así, llegaría un momento en que la separación entre dos galaxias aumentaría tan rápidamente que se volvería imposible para la luz cruzar el espacio de separación, en continua expansión. Para un observador situado en una de las galaxias, parecería como si las otras estuvieran cayendo dentro de un agujero negro. Alrededor de todas las galaxias se formarían lo que se conoce como horizontes de sucesos, es decir, límites a partir de los cuales no se puede observar ningún suceso externo.

El físico británico Stephen Hawking demostró que los horizontes de sucesos crean una radiación —llamada en su honor *radiación de Hawking*—, y en colaboración con Gary Gibbons calculó que en un universo bajo tales condiciones, cualquier observador podría apre-

ciar la radiación térmica resultante, que en 850 000 años será mucho más importante que la radiación de fondo de microondas. Gracias a ello, la temperatura del universo dejará de disminuir para mantenerse constante en 7×10^{-31} K, un valor comocido como temperatura de Gibbons y Hawking.

> Si caes en un agujero negro, no te rindas. Hay una salida.
>
> STEPHEN HAWKING

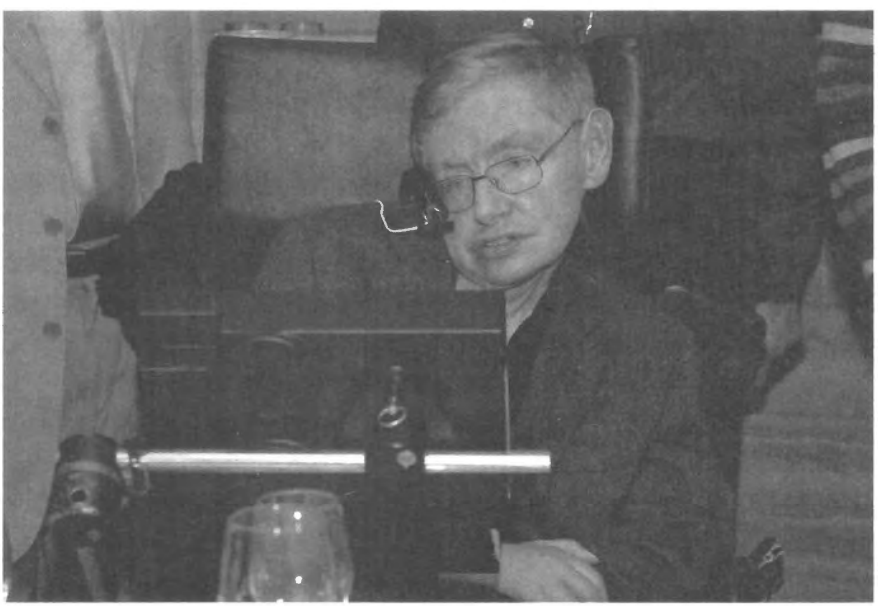
En este escenario, las estrellas se irán apagando poco a poco, dejando tan solo un universo frío y oscuro. Las últimas en hacerlo, 10^{14} años después del Big Bang, serán las menos masivas, ya que consumen el hidrógeno con mayor lentitud. A los 10^{21} años se formarán agujeros negros supermasivos en las galaxias, que atraerán y absorberán todos los cuerpos de su entorno. Hacia los 10^{64} años, los protones probablemente habrán decaído en agujeros negros virtuales muy pequeños, que conservarán su carga eléctrica positiva pero no su masa, por lo que no será posible distinguir si su origen fue un protón o un positrón. La emisión de positrones puede ser el producto de este decaimiento, de manera que estas antipartículas serán, junto con los electrones, las más masivas del universo. A los 10^{100} años de edad del universo, los agujeros negros masivos se desvanecerán en forma la radiación de Hawking, dejando un universo lleno de energía oscura inmutable, que provocará que el universo doble su tamaño cada 12 200 millones de años.

Con el tiempo suficiente y gracias a los efectos cuánticos, es probable que se creen burbujas de menor densidad. La presión negativa de la energía oscura empujará las paredes de la burbuja a expandirse a una velocidad muy cercana a la velocidad de la luz. Muchas burbujas se formarán y expandirán, pero nunca llegarán a ocupar la totalidad del espacio, de modo que el universo terminará disgregándose en un conjunto de burbujas (fig. 5).

Otra teoría, desarrollada por los físicos Andréi Linde y Alexander Vilenkin, sugiere que una fluctuación cuántica puede causar que todo el universo visible pase a un estado de vacío de alta densi-

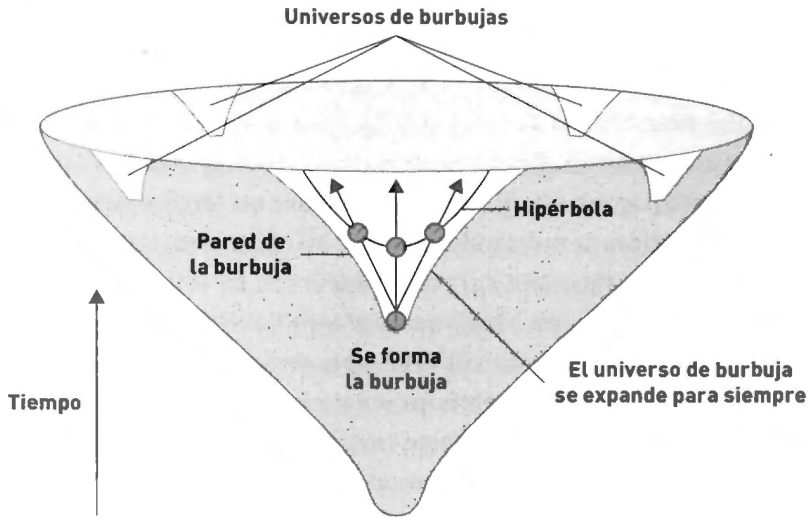
> EL FÍSICO MÁS DESTACADO DE NUESTRO TIEMPO

Stephen Hawking (Oxford, 1942) es uno de los físicos más conocidos de la actualidad. Se graduó en física y matemáticas en Oxford, en 1962. Un año después su vida cambió cuando se le diagnosticó esclerosis lateral amiotrófica. Con los años, la enfermedad redujo su capacidad de movimiento, pero no afectó en absoluto a su intelecto ni frenó su actividad científica. Pese a las dificultades, en 1966 se doctoró en física teórica, y se centró en el estudio del campo de la relatividad general. Una de sus aportaciones más importantes fue la combinación de la relatividad y la mecánica cuántica en el estudio de los miniagujeros negros, unas estructuras muy pequeñas pero muy densas, de las que él mismo sugirió la existencia. Hawking no se ha limitado tan solo a la investigación, sino que además ha sido un gran divulgador, con éxitos como *Breve historia del tiempo* (1988).



— Stephen Hawking, el físico que más ha profundizado en las teorías físicas más innovadoras.

Fig. 5



La expansión sin límite del universo en sus fases finales, alimentada por la energía oscura, dejará como rastro un conjunto de universos-burbuja, aislados entre ellos.

dad de energía y que, como consecuencia, se cree un universo justo como se creó el nuestro al principio. Puede que pasen $10^{10^{120}}$ años antes que esto suceda.

Esta propuesta, según la cual de un universo pueden aparecer muchos otros, se conoce como teoría del multiverso. En este marco existirían infinitos universos con infinitas posibilidades, donde no solo todo sería posible, sino que todo acabaría por suceder en uno u otro universo.

¿Por qué no conocemos antiuniversos?

En el hipotético caso de que haya infinitos universos, habría infinitos universos muy diferentes al nuestro, pero también infinitos

universos con diferencias mínimas. Más o menos parecidos, todos estos universos se deberían regir por las mismas leyes de la física: no puede existir un universo donde la magia de Harry Potter sea real, ya que no es físicamente posible. Esta limitación, sin embargo, no es incompatible con la posibilidad de la existencia de un universo de antimateria, formado por antipartículas, que formarían antiátomos, antiplanetas y antipersonas, que obtendrían la energía necesaria de una antiestrella, en una antigalaxia.

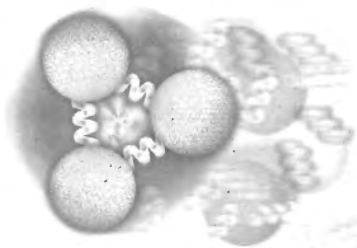
Este hipotético antiuniverso sería posible si la antimateria se rigiera exactamente por las mismas leyes que la materia. Las antipartículas tienen la carga eléctrica opuesta a las partículas, así que un universo bajo estas condiciones se conoce como universo C-invertido. Hay que tener en cuenta que al invertir absolutamente todas las cargas de todas las partículas las interacciones entre ellas no variarían, por lo que podría parecer que no hay ningún problema en que exista un universo de antimateria. Sin embargo, la carga no es la única diferencia entre las partículas y las antipartículas, aunque es la más evidente. Existen partículas sin carga, como los neutrones, o los neutrinos, y en este caso son otras propiedades, como el momento magnético o la helicidad, respectivamente, las que las diferencian de sus antipartículas.

La helicidad de una partícula es una magnitud física asociada al espín, que es una propiedad intrínseca de las partículas asociada a su rotación. De la misma forma en que todos los protones tienen la misma masa y carga, su espín tampoco difiere. Las partículas, además de moverse en el espacio, rotan sobre ellas mismas, y en función de su dirección de rotación respecto a su sentido de movimiento, se puede considerar que la helicidad es derecha (positiva) o izquierda (negativa), como se muestra en la figura 6.

De modo que las antipartículas que formarían un antiuniverso no solo tendrían invertida su carga, sino también su helicidad. Así, el antinuniverso sería como una imagen especular respecto del universo, donde todo estaría cambiado entre izquierda y de-

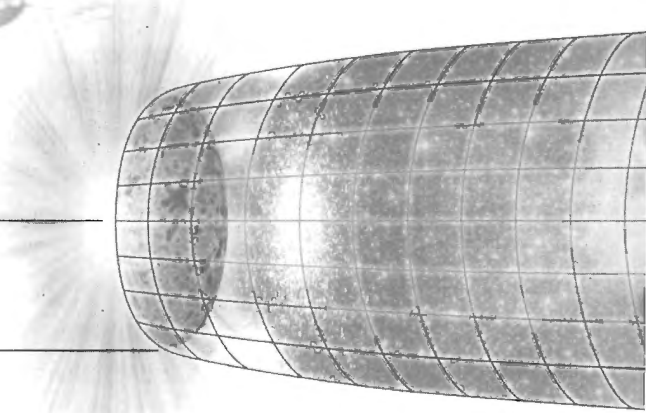
> UN UNIVERSO CAMBIANTE

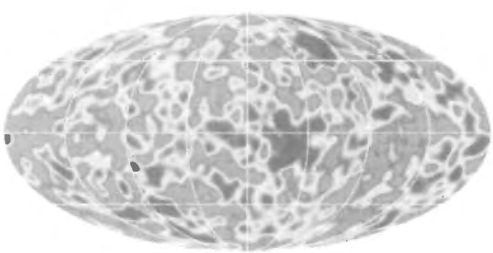
Para comprender las etapas de la evolución del universo, desde el Big Bang hasta su final previsible, hay que tener en cuenta la estrecha relación que existe entre los cambios en su estructura a escala cósmica y las formas dominantes en cada momento de la materia y la energía.



Los instantes iniciales

En los primeros instantes se produjo una rapidísima expansión, conocida como inflación cósmica. En este período se produjo la aniquilación materia-antimateria, que dejó como resto la materia del universo que conocemos.



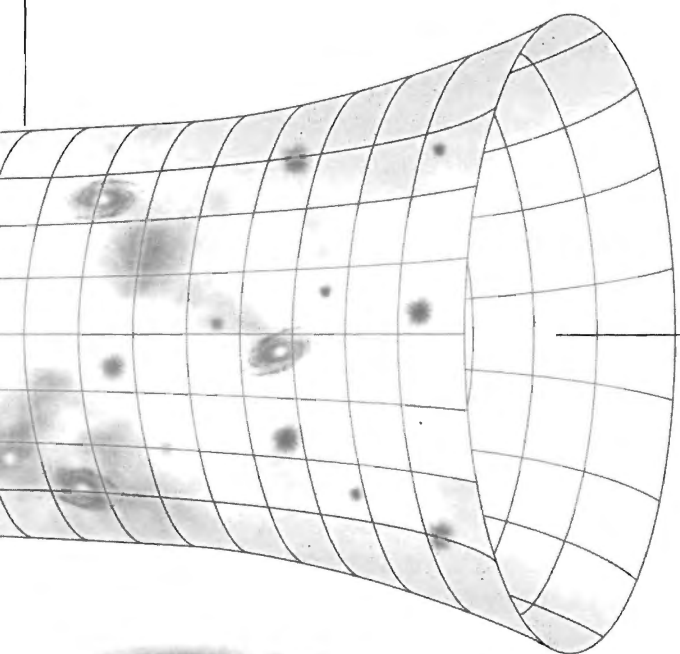


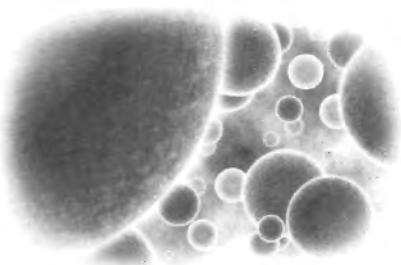
La primera imagen del universo

Unos 380 000 años después del Big Bang, la combinación de protones, neutrones y electrones para formar los primeros átomos hizo que el universo se convirtiera en un medio transparente para la difusión de los fotones.

El universo que conocemos

La atracción gravitatoria configuró el universo en el que vivimos: fue la fuerza que reunió los átomos de hidrógeno del universo primitivo y formó las primeras estrellas, factorías donde se crearon los elementos más complejos con los que se formaron luego los planetas.

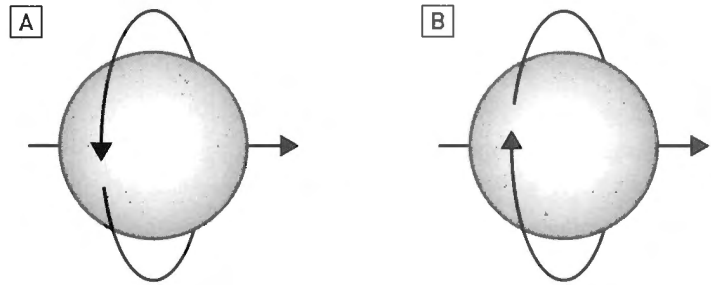




El fin del universo

Según las teorías aceptadas, la expansión del universo continuará indefinidamente, intensificada por la energía oscura. El universo como unidad desaparecerá, quedando como resto una serie de universos-burbuja, separados por un espacio vacío cada vez más frío.

Fig. 6



Las dos partículas representadas se mueven en la misma dirección, pero rotan en sentidos opuestos. Por convenio, se atribuye helicidad derecha a la partícula representada en **B** y helicidad izquierda a la de **A**.

recha. Esta relación se conoce científicamente como paridad, y a un universo con tal inversión se le llama universo P-invertido. Un universo de antimateria sería CP-invertido, tanto en la carga como en la paridad. La pregunta entonces es si en un universo bajo estas condiciones, las leyes de la física se mantendrían inalterables: ¿las ecuaciones de Newton y de Einstein, por ejemplo, podrían seguir explicando los mismos fenómenos físicos?

Esto fue cuestionado por el *Problema de Ozma*, que plantea la dificultad para explicar la diferencia entre derecha e izquierda sin una referencia física común, como sucedería si intentásemos explicarla a los interlocutores de una civilización de otra planeta. El físico estadounidense Richard Feynman afirmó que, si realmente pudiera existir un universo con paridad invertida habitado por unos seres con los que pudiéramos comunicarnos por radio, seríamos capaces de explicarles hasta las leyes más profundas de la naturaleza, pero no habría ningún experimento alguno posible que fuera capaz de demostrar la diferencia entre derecha e izquierda, como sucedería en un mundo formado por antimateria.

La preferencia por la simetría de muchos físicos teóricos les hizo suponer que era lógico esperar que también hubiera simetría en la carga y la paridad, es decir, que en un universo CP-invertido se cumplieran las leyes de la física. Por ello, tuvo un gran impacto el resultado obtenido en 1956 por los físicos chinos Tsung-Dao Lee y Chen Ning Yang: la paridad no siempre se conserva, ya que algunas interacciones relacionadas con la fuerza nuclear débil rompen esta simetría, provocando la violación de la paridad. Su trabajo, por el cual consiguieron el premio Nobel de Física en 1957, fue confirmado de forma experimental por otros científicos, como la física estadounidense de origen chino Chien-Shiung Wu. En un experimento se enfriaron átomos de cobalto radiactivo hasta temperaturas cercanas al 0 absoluto y se sometieron a un fuerte campo magnético, de modo que quedaron todos alineados en la misma dirección: si la paridad se conservaba, emitirían electrones en la misma dirección que su eje de rotación. Los resultados experimentales demostraron que no era el caso y que, efectivamente, se daba una violación de la paridad. Este resultado implica que, contra lo que defendió Feynmann, sí es posible explicar a los habitantes de un antimundo cómo diseñar un experimento para definir los conceptos de derecha e izquierda. Por tanto, en un universo de antimateria, C-invertido, no se cumplirían las leyes de la física, así que no podría existir, o al menos no lo haría de la misma forma que nuestra realidad física.

> En nuestra exploración de la naturaleza, la interacción entre nuestros conceptos y nuestras observaciones puede llevar a aspectos totalmente inesperados.
>
> Tsung-Dao Lee

Quedaba aún por considerar si se cumpliría la simetría al unir la paridad con la carga, es decir, si un universo con carga y paridad invertidas (universo CP-invertido) sería posible. Según esta hipótesis, un universo de antimateria seguiría siendo posible ya que son ambas propiedades las que se invierten. Poco duró esta esperan-

za, ya que, en 1964, James Cronin y Val Fitch llevaron a cabo un experimento que demostró también la violación de la simetría CP, por lo que recibieron el premio Nobel de Física en 1980. Así pues, a partir de estos resultados se desestimó en principio la opción de que hubiera antiuniversos: gracias a la violación CP existe nuestro universo tal y como lo conocemos, formado por materia.

Quedaba una posibilidad para conseguir un universo de antimateria que se adecuara a las leyes de la física, que consistía en considerar una flecha del tiempo distinta. En este caso, se considera un universo CPT-invertido, con carga opuesta, paridad invertida y el tiempo transcurriendo en sentido contrario. En este nuevo escenario, las leyes de la física sí se cumplirían, de manera que la física permitiera la existencia de un universo de antimateria, con la condición de que en él, el tiempo fluya del futuro hacia el pasado, tal y como lo entendemos. A la postre, aunque la simetría con el tiempo permitiría la existencia de un antiuniverso, es esta misma condición la que impediría que nunca pudiéramos llegar a comunicarnos con un hipotético universo de este tipo.

Antimundos infiltrados en el universo

Los experimentos hasta el momento, han demostrado que la fuerza nuclear débil no es simétrica, pero no han demostrado una asimetría suficiente para explicar el exceso de materia en nuestro universo. Entonces ¿sería posible que hubiera antimundos en nuestro universo? Ha habido teorías, con muy poca aceptación, que defendían que en los primeros instantes del Big Bang, cuando se creó la materia y la antimateria, la expansión fue tan rápida que hizo que no tuvieran tiempo de interaccionar y que se separaran, creando algunas galaxias de materia y otras de antimateria.

Una forma rápida de detectar si hay galaxias de antimateria sería detectar un núcleo de un antiátomo, por ejemplo, un antihelio

cuya existencia en una galaxia de materia sería tan improbable como para que, si se detectara, poder asumir que proviene de una antigalaxia. Existen programas de investigación espacial que, entre otros objetivos, tratan de detectar antihelio, pero los resultados hasta el momento negativos no son garantía de que no existan antigalaxias, ya que incluso si existieran sería enormemente difícil que el núcleo llegara al detector y que no hubiera interaccionado con materia por el camino.

Otra posible forma de detectar una antigalaxia, más concretamente una antiestrella, sería observar la radiación que emite. En el interior de una estrella, los protones se convierten en neutrones con liberación de positrones de helicidad derecha; de manera simétrica, en el núcleo de una antiestrella se liberarían electrones, cuya helicidad sería izquierda. Estas partículas creadas en el interior de las estrellas, tanto si son electrones como positrones, producen una radiación electromagnética, conocida como *radiación de frenado* o *Bremsstrahlung* (término alemán con el mismo significado), las propiedades de la cual varían según la helicidad de la partícula que la ha creado. Por tanto, al analizar esta radiación, sería fácil determinar si proviene de una estrella o de una antiestrella.

Las pruebas experimentales nos permiten obtener cada vez más conocimiento sobre el universo y su evolución, sin que se haya observado ninguna estrella ni galaxia formada por antimateria. La teoría de la ruptura de simetría y el exceso de materia en el universo está ampliamente aceptada. Sin embargo, hay que tener en cuenta que es mucho más complicado demostrar que una cosa no ha sucedido que lo contrario: por ejemplo, para demostrar la existencia de vida extraterrestre bastaría con encontrar un solo organismo proveniente de otro mundo, pero ¿cómo demostrar que no existe? Lo mismo sucede en el caso de la antimateria: hasta que no haya pruebas definitivas de que solo existe materia en el universo, es mejor dejar la puerta abierta a cualquier posibilidad, por muy diminuta que sea.

Los secretos de un universo complejo se van descubriendo poco a poco. La ciencia ha demostrado cómo las claves más ocultas del cosmos y de su evolución mantienen una estrecha relación con las propiedades de las partículas elementales. El modelo estándar que define la física de partículas sigue en desarrollo y en él, el papel de la antimateria resultará clave. A medida que aumente y se refine el conocimiento sobre ella, comprenderemos mejor las leyes que gobiernan la realidad física y estaremos mejor capacitados para crear nuevas tecnologías capaces de aprovechar las potencialidades de la antimateria.

04

¿PARA QUÉ SIRVE LA ANTIMATERIA?

Estudiar y entender en profundidad la antimateria tiene un doble objetivo: comprender la naturaleza del universo y llegar a crear aplicaciones útiles para la humanidad. La física ha de tener en cuenta el papel de la antimateria para establecer las leyes fundamentales de la realidad, cuyo conocimiento será imprescindible para el desarrollo de nuevas tecnologías.

En una sociedad tan altamente dominada por la ciencia y la tecnología como la contemporánea, los avances en estos campos son cada vez más importantes, y responden a retos esenciales, como encontrar curas a las enfermedades, combatir el cambio climático o mejorar la gestión de las fuentes de energía. Gracias a la investigación científica se han conseguido hitos inimaginables hace pocas décadas, y eso nos permite soñar en un futuro hasta ahora inconcebible. Ni el mismo Isaac Newton hubiera podido imaginar que al cabo de 300 años las comunicaciones se podrían realizar por correo electrónico o que los retratos serían instantáneas que se pueden observar en una pantalla digital. Hoy, ya nada se cree imposible y, para bien o para mal, ya no existen límites a los posibles logros de la humanidad: podemos imaginar un futuro con teletransporte, una sociedad sin enfermedades en un planeta verde o la expansión de la especie humana por el universo.

La antimateria es uno de los elementos que puede contribuir a un cambio tecnológico radical. Con el fin de aprender a controlarla, disminuir el coste de su producción o almacenarla, es necesario seguir

investigando para desarrollar mejores técnicas y llegar a comprender todas sus características. Su uso como fuente de energía tendrá un papel clave en la exploración del universo. Además, el estudio de sus propiedades puede ampliar los grandes avances que ya se han conseguido en su aplicación en tratamientos médicos. Es difícil concebir un futuro sin un papel significativo de la antimateria, por lo que es una de las áreas principales de estudio en los laboratorios de física de partículas. Es lógico esperar que cuando sus secretos más profundos salgan a la luz del conocimiento, ofrezca posibilidades que todavía somos incapaces de imaginar.

> El descubrimiento de la antimateria puede que sea el salto más grande de todos los de la física de nuestro siglo.
>
> STEPHEN HAWKING

EL RETO DE MANEJAR ANTIMATERIA

Sin lugar a duda, la antimateria tiene un gran potencial para ser uno de los descubrimientos que, bien usado, ayude a cambiar el futuro de la humanidad. Pero esto no ocurrirá mientras no se conozcan y se dominen sus propiedades a la perfección: se debe crear de forma económicamente rentable, poder almacenar durante prolongados períodos de tiempo y transportar con seguridad. Hasta el momento, el uso más importante de la antimateria se encuentra en los laboratorios de partículas y se centra en la investigación científica, ya que sin investigación no hay conocimiento y sin conocimiento no hay innovación.

Cómo crear el negativo de la materia

La física de partículas es, en general, un campo en el que la investigación es extremadamente difícil, debido a factores como el tama-

ño de las partículas o las altas velocidades a las que se mueven. Según el tipo de partícula que se quiera estudiar los retos aumentan, ya que pueden ser poco comunes en la naturaleza, con vidas muy cortas o difíciles de detectar. Con el fin de facilitar este trabajo, los laboratorios en los que se estudian sus propiedades están dotados con aceleradores de partículas. Su función es impulsar haces de partículas para que se muevan a velocidades muy altas, adquiriendo elevados niveles de energía. Cuando se hace colisionar dos de estos haces, se desprende tanta energía en el choque que se crean partículas y antipartículas que al principio no estaban presentes: por ejemplo, del choque entre haces de electrones suficientemente energéticos se crean pares electrón-positrón.

También se puede provocar una colisión de un haz de partículas contra un blanco estático, pero resulta menos energética, ya que una parte de las partículas involucradas no está en movimiento. Hay que tener en cuenta que la creación de partículas es más efectiva si es más energética. Por ese motivo, la mayoría de aceleradores hacen colisionar partículas pesadas (en la escala de las partículas subatómicas), como protones, ya que al tener más masa necesitan menos velocidad para alcanzar el mismo nivel de energía que un electrón. De hecho, uno de los procedimientos más efectivos de los aceleradores de partículas es hacer colisionar un haz de protones con uno de antiprotones, ya que se logra obtener niveles de energía aún mayores, producto de la aniquilación entre ambos haces. Tanto protones como antiprotones se clasifican como bariones (partículas formadas por tres quarks), y permiten la creación de más tipos de partículas que al hacer colisionar leptones, entre los que se cuentan los electrones y los positrones.

Los aceleradores que trabajan con haces de protones y antiprotones tienen otra gran ventaja: su funcionamiento es mucho más simple. En experimentos en los que se provoca la colisión entre dos haces del mismo tipo de partículas, es necesario tener dos aceleradores separados —dos tubos— y que cada uno las acelere en senti-

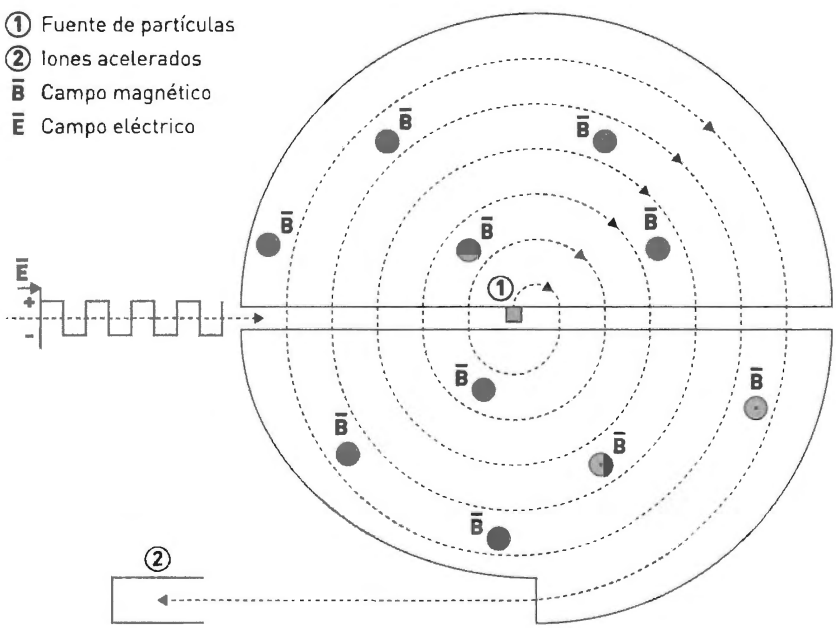
dos opuestos para que finalmente se produzca la colisión en uno o más puntos. En cambio, si se usan protones y antiprotones el mismo sistema los acelera en direcciones contrarias en un solo tubo, debido al signo opuesto de su carga. En este caso, solo es necesario mantener los haces separados unos centímetros en el vacío de un tubo, hasta que llegan al punto donde se desea que impacten entre ellos.

Sin embargo, para poder utilizar antiprotones en los aceleradores primero se tienen que llegar a crear y dominar estas antipartículas, lo que no es tarea fácil. Después del descubrimiento del antiprotón, realizado en 1955, se tardó hasta 1981 para poder provocar la primera colisión de antiprotones con protones. Como las antipartículas son difíciles de almacenar, se inyectan inmediatamente después de ser creadas en aceleradores de partículas menos potentes. Así, para crear primero antiprotones se provoca la colisión de protones contra un blanco, en la que la energía cinética del haz se convierte en una lluvia de fotones y de pares de partícula-antipartícula. El siguiente paso es utilizar las características físicas de los antiprotones (su masa y su carga eléctrica) para separarlos del resto de partículas resultantes de la colisión, como piones y antipiones, electrones y positrones o neutrones y antineutrones (que, por su parte, pueden ser estudiadas o utilizadas en otros experimentos). Para focalizar en una misma dirección los antiprotones, que se dispersan en un gran rango de ángulos, se utilizan campos magnéticos que modifican sus trayectorias. Las velocidades de los antiprotones obtenidos son bastante elevadas, de modo que el acelerador debe realizar relativamente poco trabajo para llevarlos hasta los niveles deseados.

Colisionar con protones no es la única utilidad de los antiprotones: a menudo son objeto de estudio o se utilizan para crear antiátomos. Para ello, no es suficiente con crearlos, sino que es necesario primero enfriarlos: se debe conseguir la mínima variación energética entre ellos, de manera que todos se muevan dentro de

> IMPULSORES DE PARTÍCULAS

La forma más común de clasificar los aceleradores de partículas distingue entre los que tienen forma rectilínea y los que la tienen de anillo. Los primeros están formados por placas que atraen o repelen las partículas para acelerarlas. El más largo, con 3 km de longitud, es el colisionador electrón-positrón SLAC, de la Universidad de Stanford. Los aceleradores circulares tienen la ventaja de que el recorrido de las partículas en su interior puede ser más largo, imprimiendo aceleraciones más elevadas. Se pueden clasificar en ciclotrones, con campo magnético constante, en los que las partículas se mueven en espiral hasta una salida, y en sincrotrones, con campo magnético variable y recorrido cerrado, en los que las partículas pueden dar vueltas indefinidamente. El acelerador circular más potente es el LHC, el sincrotrón que se encuentra en el CERN.

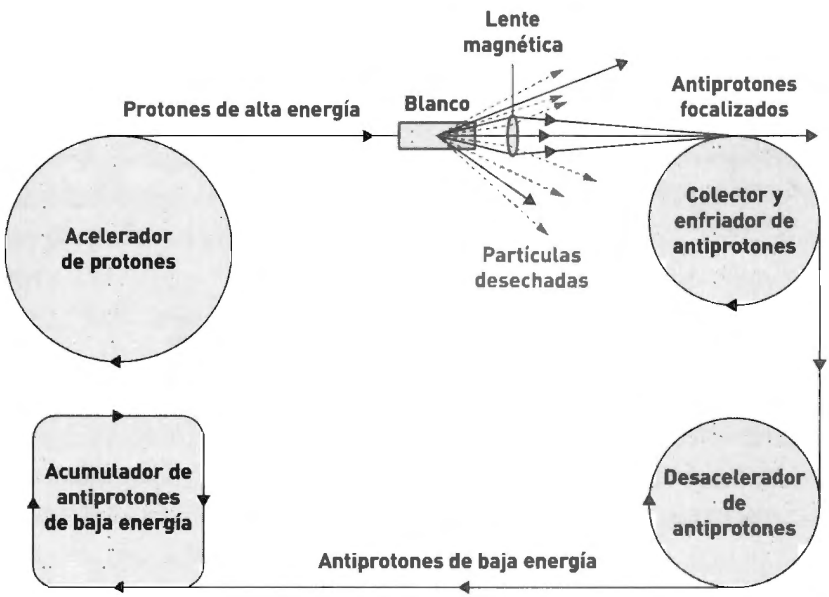


— Esquema del circuito espiral de un ciclotrón.

un mismo rango de velocidades. Después, es necesario disminuir su energía y desacelerarlos para poder almacenarlos (fig. 1).

Para reducir la velocidad de los antiprotones lo más común es el uso de campos eléctricos, aunque existen otros métodos para llevar a cabo esta tarea. Otra opción es usar un acelerador de protones, que tiene en los antiprotones el efecto contrario: en lugar de aumentar su velocidad, disminuye su energía y la reduce. Al moverse más lentamente, los antiprotones se vuelven más sensibles a campos exteriores, como el campo magnético terrestre, por lo que el anillo desacelerador tiene que estar equipado para contrarrestar estos efectos. Una tercera posibilidad es hacer pasar los antipro-

Fig. 1



Para conseguir antiprotones, una vez se producen en un acelerador de partículas, se deben reunir, ralentizar y confinar en dispositivos especiales, siguiendo las etapas que se muestran en este esquema.

tones por una cámara que contenga una nube de positrones poco energéticos, con lo que se consigue un doble objetivo: la mayor parte de los antiprotones reducirán su energía, y el resto se unirán a positrones formando átomos de antihidrógeno, cuyo estudio tiene un gran interés científico por sí mismo.

Almacenar lo casi incontrolable

Una vez creados antiprotones o átomos de antihidrógeno es necesario almacenarlos para poder estudiar sus propiedades. Los átomos de antihidrógeno son complicados de contener, ya que son eléctricamente neutros, por lo que no se pueden controlar mediante campos eléctricos. Afortunadamente, sí que responden a los campos magnéticos y gracias a ello se pueden almacenar durante un período de tiempo antes de que se aniquilen con la materia. Sin embargo, sigue siendo un reto tan importante almacenarlos que se tienen que crear miles de ellos para conservar solo unos pocos. De hecho, con las técnicas más avanzadas se llegan a producir hasta 25 000 átomos de antihidrógeno por cada intento, pero solo se consigue controlar una media de 14 de ellos, es decir, un 0,056%.

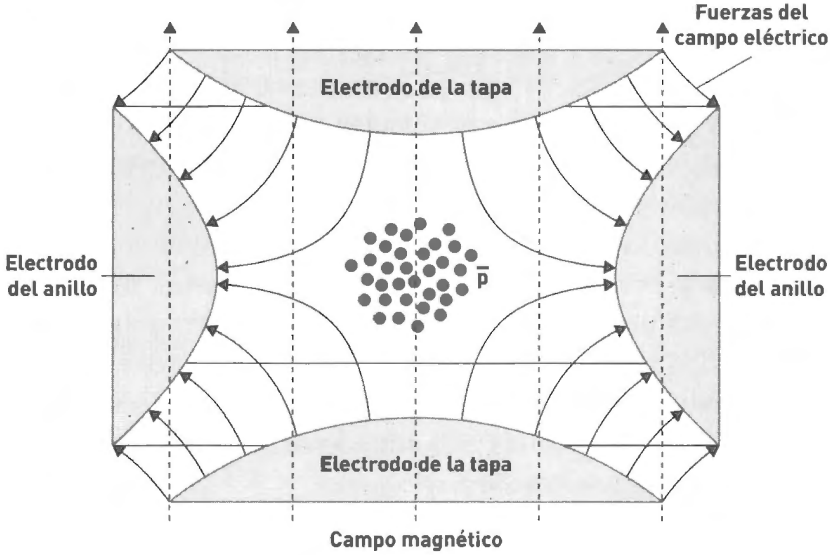
Los antiprotones también se pueden confinar mediante campos magnéticos y, con la configuración correcta, pueden mantenerse circulando por un tubo de vacío, evitando cualquier contacto con la superficie de la instalación. Aprovechando la naturaleza eléctrica de estas antipartículas, existe otra forma de almacenamiento menos aparatosa, que se utiliza para almacenar partículas cargadas: es la llamada *trampa de Penning*.

El físico neerlandés Frans Michel Penning no fue ni quien ideó este dispositivo ni quien lo construyó, contra lo que parece sugerir su nombre. Sus inventores fueron Hans Georg Dehmelt y Wolfgang Paul, quienes decidieron ponerle este nombre ya que se habían inspirado en un medidor de vacío que sí había construido Penning.

Ambos científicos fueron galardonados en 1989 con el premio Nobel de Física por su invención.

La trampa de Penning (fig. 2) se debe instalar en una cámara de vacío y en el interior de un imán superconductor, formado por un solenoide conductor dispuesto en un recipiente de helio líquido, para mantenerlo muy frío y que así pueda soportar grandes corrientes eléctricas permitiendo crear campos magnéticos de gran intensidad. Las paredes laterales de la trampa consisten en un anillo metálico sólido con dos tapas en forma de copa, en las partes superior e inferior, y su interior tiene una forma hiperbólica. Una vez el antiprotón entra en la trampa, las tapas reciben una carga negativa que lo repele, impidiendo que siga una dirección axial. Debido a esto, el antiprotón tiende a moverse radialmente hacia el anillo, que ha

Fig. 2



Las fuerzas eléctricas y magnéticas generadas en una trampa de Penning confinan a las partículas con carga eléctrica en una pequeña órbita circular, en un espacio vacío reducido.

sido cargado positivamente, pero el campo magnético se lo impide y lo mantiene en una trayectoria circular.

Por sus características físicas, las trampas de Penning descritas tienen una reducida capacidad de almacenaje, que se ha usado para mantener unos pocos antiprotones y facilitar el estudio preciso de algunas de sus propiedades, como la masa, que se ha comparado con la del protón. Hay trampas de Penning mayores, que se utilizan para almacenar más cantidad de antiprotones y llevar a cabo experimentos en los que el número sí es importante. En este caso, se construyen con forma cilíndrica, y en ellas, aunque es más difícil que los antiprotones lleguen a alcanzar las paredes, quedan confinados en un volumen mayor, por lo que solo son efectivas para experimentos en los que la precisión con la que se localizan los antiprotones retenidos no es un aspecto esencial.

INVESTIGAR LA ANTIMATERIA

A lo largo del siglo XX se invirtieron grandes cantidades de tiempo y dinero en mejorar las técnicas destinadas al estudio de la antimateria, un esfuerzo que ha obtenido una mejora muy significativa en los resultados más recientes. El número de estudios orientados a entenderla se ha incrementado en gran medida, en especial los destinados a medir algunas de las magnitudes físicas de las antipartículas, para poder detectar diferencias entre las partículas de la materia común y sus gemelas en el mundo de la antimateria.

Estos experimentos, realizados en los grandes aceleradores de partículas, buscan aumentar su eficiencia situando detectores muy cerca de los puntos de colisión entre los haces, con el objeto de localizar y analizar el máximo de partículas posibles y sus características durante las escasas fracciones de segundo que muchas de ellas permanecen a su alcance. Los detectores suelen estar especializados y tener un objetivo muy concreto, que puede ir desde detectar nuevas

partículas a estudiar en profundidad las propiedades de las conocidas o sus interacciones, así que a menudo se utiliza más de uno para poder sacar el máximo provecho de los resultados de una colisión.

Uno de los principales objetos de estudio son los antiprotones y sus características, ya que son relativamente fáciles de crear, almacenar y estudiar, y si se detectara una sola y diminuta diferencia inesperada con el protón podría significar un enorme salto en el conocimiento de las leyes de la física. Por este motivo se han destinado varios experimentos a medir su masa, aunque es de esperar que sea exactamente igual que la del protón, como hasta el momento han demostrado los resultados experimentales.

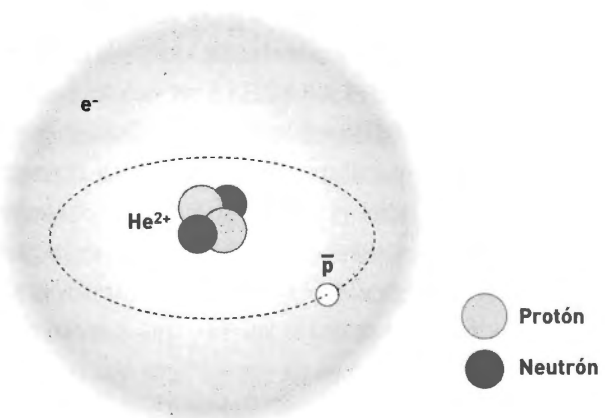
Otro de los principales focos de estudio son los átomos de antihidrógeno, de los cuales se intenta obtener el espectro. El espectro de un elemento se obtiene cuando se le suministra energía para excitar sus electrones, que saltan a orbitales atómicos superiores para luego recuperar su estado elemental. Al bajar de nivel, los electrones emiten fotones con una energía concreta, característica para cada elemento, de modo que estudiando los fotones emitidos se puede identificar el tipo de átomos que los han generado. Este método es muy usado en astronomía para determinar los elementos de los que están formadas las estrellas, a partir del análisis del espectro de la luz recibida. En el caso de los átomos de antihidrógeno, no son los electrones los que se excitan, sino los positrones que orbitan alrededor del núcleo, formado por un antiprotón. Hasta el momento, se han obtenido exactamente los mismos resultados al estudiar el espectro del hidrógeno y el del antihidrógeno.

Un examen en profundidad de la antimateria

Pese a no haberse registrado diferencias significativas entre las propiedades estudiadas en protones y antiprotones, o en hidrógeno y antihidrógeno, los científicos no se rinden. Por ese motivo, en

1997 se estableció un programa de colaboración internacional destinado a medir con precisión cada vez mayor las propiedades de la antimateria, en un intento de demostrar o desmentir sus simetrías fundamentales con la materia. Este experimento se realiza bajo el nombre de ASACUSA (Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons, Espectrocopía Atómica y Colisiones Usando Antiprotones Lentos) y se lleva a cabo en las instalaciones del CERN, por ser las más potentes y desarrolladas del mundo. Utiliza técnicas de espectroscopía de precisión en átomos que contienen un antiprotón, como el antihidrógeno y el helio antiprotónico. Este último es un átomo mixto de materia y antimateria, en el que un antiprotón ocupa el lugar de uno de sus dos electrones, de manera que queda formado por un antiprotón y un electrón orbitando alrededor de un núcleo de helio (fig. 3). Para formar estos átomos mixtos es necesa-

Fig. 3



El helio antiprotónico, en el que un electrón (e^-) y un antiprotón ($\bar{p}$) orbitan alrededor de un núcleo de helio, es un elemento mixto formado por partículas de materia y de antimateria.

rio introducir antiprotones en una cámara con helio gaseoso, con el resultado de que aproximadamente el 3% de los antiprotones llegan a ocupar el lugar de uno de los dos electrones de un átomo de helio, formando el átomo mixto.

Entre los principales objetivos de ASACUSA destaca el estudio de la estructura hiperfina del antihidrógeno (una propiedad física característica para cada elemento, muy sensible al efecto de los campos magnéticos) y compararla con la del hidrógeno. En este caso, no sirve la técnica de almacenamiento mediante campos magnéticos usada en la trampa de Penning, ya que estos perturbarían los resultados. La solución adoptada descarta almacenar los antiátomos y opta por crear un haz y llevarlo a una zona donde ningún campo de ningún tipo tenga influencia sobre él. Con este fin, se hace pasar el haz de antihidrógeno por una trampa de Cusp, un dispositivo en el que la configuración de una serie de imanes y electrodos permiten obtener el mínimo campo magnético y las mejores condiciones posibles para poder estudiar los antiátomos mediante microondas. Este método garantiza el almacenamiento y manipulación de un mayor número de antiprotones y positrones.

Otra de las finalidades del ASACUSA es medir la masa del antiprotón. En este caso, se utilizan átomos de helio antiprotónico. Mediante láseres se excita el antiprotón, llevándolo a un nivel energético superior, lo que permite medir la masa del antiprotón con una precisión sin precedentes. En noviembre de 2016, se publicaron en la revista *Science* resultados de la medida del valor de la masa del antiprotón en relación con la del electrón, que confirmaban de nuevo que la masa de antiprotón es exactamente igual a la de protón.

Hay, sin embargo, algunos experimentos que evidencian diferencias entre el comportamiento de la materia y la antimateria, que de ser descifrados correctamente pueden desvelar aspectos muy profundos de las leyes de la física. En la década de 1960, por ejemplo, se observó por primera vez, en el laboratorio estadounidense de Brookhaven, una ruptura de simetría entre la materia y la antimateria, en el com-

portamiento de unas partículas llamadas *kaones*. Desde entonces se ha observado la violación de simetría CP en más partículas, principalmente en mesones, formados por un quark y un antiquark.

Resultados aún más importantes se obtuvieron a principios de 2017, cuando un estudio reveló que esta asimetría finalmente también se había detectado en bariones (partículas formadas por tres quarks). Comparando el proceso de decaimiento entre dos bariones, la partícula Λ_b^0 y su antipartícula $\overline{\Lambda_b^0}$, en un protón (o antiprotón) y tres piones cargados, lo que se trata de una forma de decaimiento muy rara para tales partículas, se pudo observar una diferencia significativa, de casi un 20% de diferencia entre los casos en que la partícula decae de esta manera y las veces en que lo hace la antipartícula. De volver a observarse estos resultados, sería un paso enorme para poder explicar el exceso de materia del universo. El modelo estándar, por su parte, predice la existencia de una diminuta cantidad de violaciones de la simetría CP, pero no es ni mucho menos suficiente para explicar la desigualdad medida según se trate de materia o de antimateria, por lo que, de confirmarse, se probaría la necesidad de nuevas teorías físicas más allá de este modelo. La combinación de ambos factores situaría tal descubrimiento como uno de los más grandes e importantes de la física contemporánea.

> El descubrimiento de la violación del CP fue una completa sorpresa para la comunidad física en general.
>
> J. Cronin

DIAGNOSTICAR Y CURAR CON ANTIMATERIA

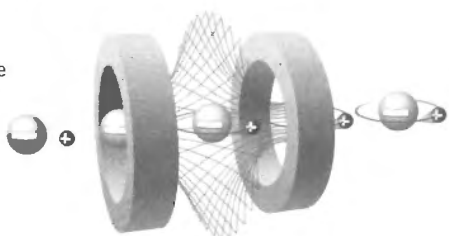
La antimateria tiene un papel clave en medicina, área en la que se usa para obtener imágenes de alta calidad del interior del cuerpo humano, mediante una técnica conocida como tomografía por emisión de positrones (PET). Su funcionamiento se basa en introducir

> UNA ANALIZADOR DE ANTIMATERIA

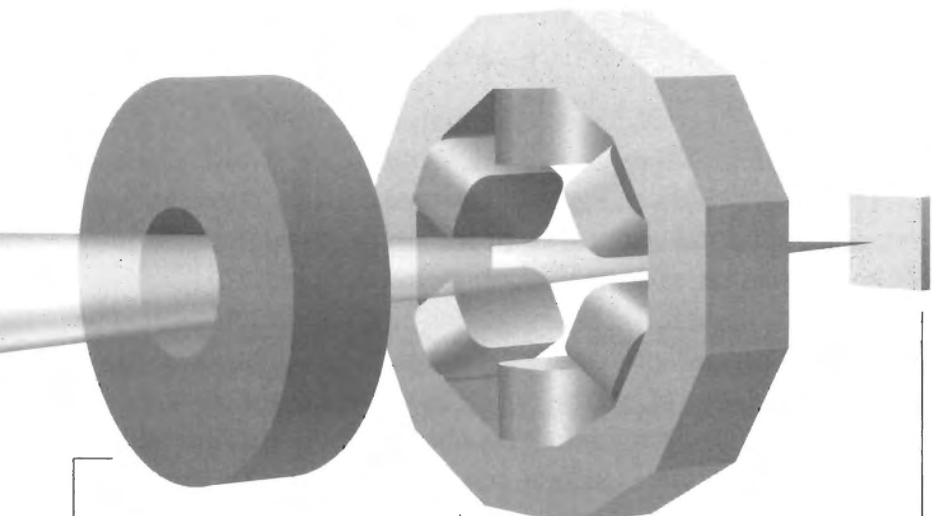
El experimento ASACUSA es un complejo analizador de antimateria. Trabaja con antihidrógeno, el antiátomo más simple, que se crea combinando antiprotones con positrones dentro de una trampa de Cusp. Este dispositivo posee una configuración de campos electromagnéticos que forma haces de

Trampa de Cusp

Los positrones obtenidos de una fuente radiactiva se introducen en este dispositivo y se mantienen en estado de plasma. Se combinan con los antiprotones creados en un acelerador de partículas, para formar antihidrógeno. Las bobinas superconductoras y los electrodos anulares de la trampa mantienen estable la simetría del haz de antipartículas.



antiátomos polarizados. A continuación, las transiciones hiperfinas, propias de cada elemento, se analizan en una cámara de microondas y se comparan con las del hidrógeno. Por último, mediante un imán de alta intensidad se confinan los antiátomos, que se identifican en un detector.



Imán de seis polos

Crea un campo magnético que permite modificar la dirección de los antiátomos y focalizarlos hacia el detector.

Cámara de microondas

En su interior se invierte el espín de los positrones, provocando la transición hiperfina del antihidrógeno.

Detector de antihidrógeno

El registro de las partículas resultantes de la aniquilación entre materia y antimateria en el detector permite determinar la cantidad de antihidrógeno creado.

por vía intravenosa un marcador radiactivo para luego analizar la distribución de la radiación detectada (fig. 4).

La sustancia más comúnmente usada es la fluordexosiglucosa (^{18}F-FDG), un análogo de la glucosa que contiene un átomo de un isótopo radiactivo del flúor, el ^{18}F. El núcleo de este isótopo, que contiene nueve protones y nueve neutrones, se desintegra casi el 97% de las veces siguiendo una desintegración β+, que implica la conversión de un protón (p+) del núcleo en un neutrón (n), desprendiendo un positrón (e+) y un neutrino (ν_e):

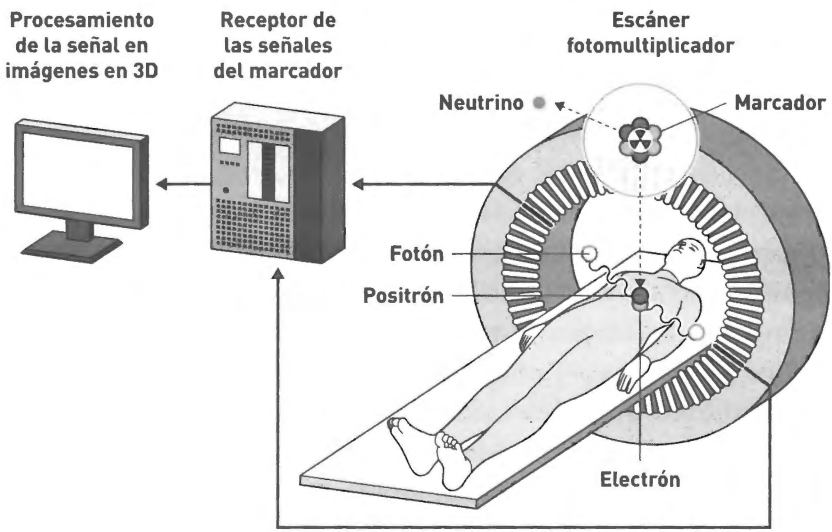
$$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

Los positrones emitidos se aniquilan con los electrones de su entorno y emiten dos rayos gamma. Observando y analizando la concentración de esta radiación de fotones de alta energía en las diferentes zonas del cuerpo, se puede obtener una imagen muy precisa de la forma, tamaño y estado de los órganos.

Tras la desintegración de uno de los protones del flúor, este se convierte en un isótopo pesado del oxígeno, con ocho protones y diez neutrones, que el cuerpo puede metabolizar sin ninguna dificultad. Por eso, este método para obtener imágenes médicas se considera poco invasivo, aunque someta al cuerpo a un cierto grado de radiactividad. Gracias a la calidad de las imágenes obtenidas y a los bajos riesgos que conlleva, es una de las técnicas más importantes para conseguir imágenes médicas de alta precisión.

Esta técnica se utiliza en varias ramas de la medicina con distintos matices: en oncología, por ejemplo, permite determinar la forma y tamaño de los tumores, o bien si se han esparcido hacia otros órganos del cuerpo, lo que se conoce como metástasis, mientras que en neurología, permite registrar el grado de actividad neuronal, partiendo de la asunción de que las zonas con mayor emisión de positrones corresponden a las de mayor actividad. También sirve para detectar enfermedades o hacer un seguimiento ajustado en otros campos como la cardiología o el estudio de las enfermedades

Fig. 4



En la tomografía por emisión de positrones (PET), la imagen para el diagnóstico médico se obtiene a partir de la detección de los positrones emitidos por la desintegración de un marcador radiactivo.

infecciosas. Los mismos principios de aplicación médica de la PET se aplican en farmacología y veterinaria.

A pesar de su gran versatilidad, esta técnica tiene algunas limitaciones. Para empezar, la mayoría de los isótopos radiactivos que se pueden usar tienen un tiempo de vida demasiado corto como para ser transportados con facilidad, así que a menudo se necesitan ciclotrones en las mismas instalaciones médicas donde se realizan las pruebas, lo que tiene importantes repercusiones económicas, puesto que la instalación de un ciclotrón requiere una inversión muy elevada. Esta condición restringe el uso de muchos isótopos y favorece el de la fluordexosiglucosa, ya que tarda lo suficiente en desintegrarse como para que se pueda desplazar distancias consi-

derables. Otras de las sustancias que se pueden usar son el carbono-11 o el nitrógeno-13, que también siguen un decaimiento beta, pero con una vida media mucho más corta.

Antimateria contra el cáncer

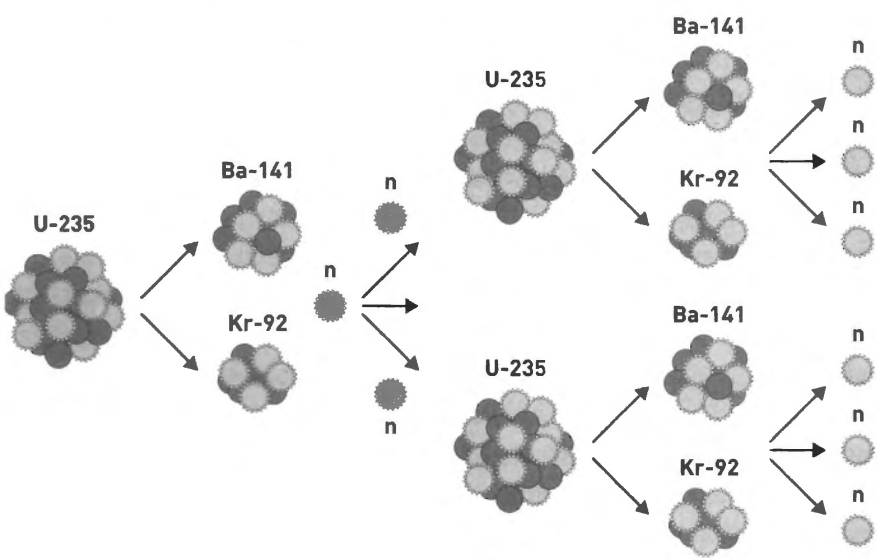
Se espera que en un futuro no muy lejano se puedan desarrollar nuevas aplicaciones de la antimateria en medicina. Entre ellas, hay una línea de investigación avanzada cuyo objetivo es obtener una técnica que no solo permita obtener imágenes para el diagnóstico de algunas enfermedades, como el cáncer, sino que además sea capaz de proveer las herramientas necesarias para combatirlas con los mínimos efectos secundarios posibles. Entre 2003 y 2013, en el CERN se llevó a cabo una colaboración denominada ACE (Antiproton Cell Experiment), formada por físicos, biólogos y médicos, con el objetivo de evaluar la viabilidad y las ventajas de usar antiprotones, en lugar de protones, como tratamiento contra el cáncer.

Una de las terapias más eficientes para destruir tejido cancerígeno es la protonterapia, en la que se usa un haz de protones para destruir las células malignas. Las partículas se irradian hacia el tumor con la energía exacta para que penetren hasta la profundidad deseada. Al profundizar en el cuerpo, los protones prácticamente no causan ningún daño, pero al final de su recorrido, cuando disminuyen su velocidad sí que se producen efectos significativos. Esta terapia, además de destruir las células cancerígenas también afecta a algunas de las células sanas que se encuentran por el camino o alrededor del tumor y, a medida que se repite el tratamiento, sus efectos perjudiciales aumentan.

La colaboración ACE estudió la posibilidad de hacer el mismo tratamiento menos nocivo para las células sanas utilizando antiprotones, aprovechando los efectos de la aniquilación de la materia con la antimateria. En función de sus condiciones iniciales, los antipro-

> ¿CUÁNTO DURA UN ELEMENTO RADIACTIVO?

La magnitud con la que se acostumbra a medir el tiempo de desintegración de un elemento es la semivida o período de desintegración. Se define como el lapso necesario para que se desintegre la mitad de los núcleos radiactivos de los átomos de una muestra. La semivida es un valor estadístico, característico de cada isótopo, que no se puede aplicar átomo a átomo: el momento en que se desintegrará un átomo concreto es aleatorio (es decir, no se puede predeterminar). Hay isótopos muy poco estables, como el oxígeno-15, que tiene una semivida de 122 segundos, y otros mucho más estables, como el uranio-235, con una semivida de más de 700 000 000 años. La semivida solo indica probabilidades: si se dispone, por ejemplo, de una muestra de 100 átomos con una semivida de 10 segundos, esto significa que es muy probable que al cabo de 10 segundos queden alrededor de 50 átomos sin alterar; dicho de otro modo, la probabilidad de que uno de los átomos se haya desintegrado al cabo de 10 segundos es del 50%.



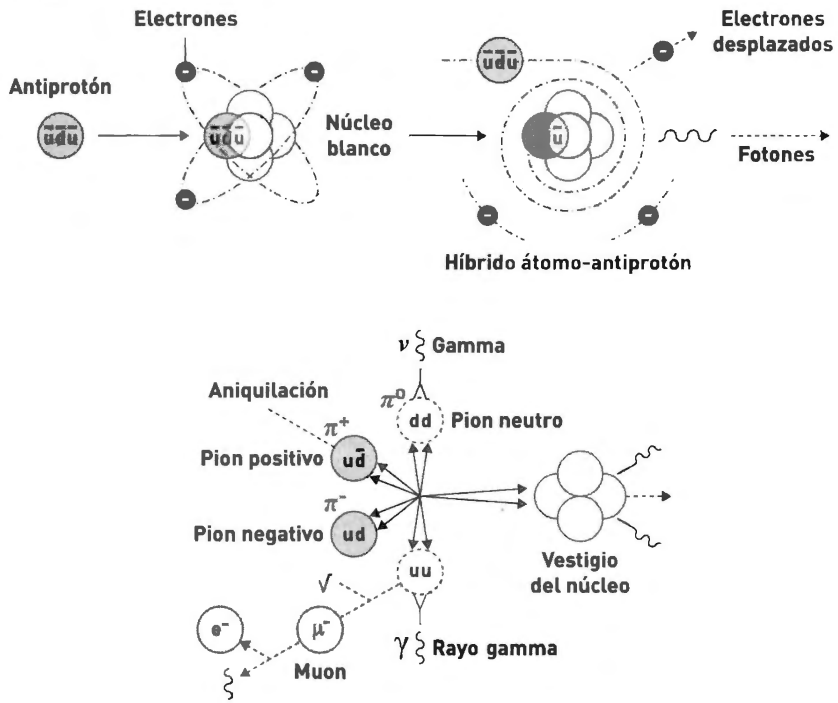
— Esquema de la desintegración radiactiva del uranio-235, con emisión de neutrones que puede iniciar una reacción en cadena.

tones pueden penetrar hasta una cierta profundidad en la materia rebotando sobre las capas de electrones de los átomos. Cuando un antiprotón se detiene cerca de un átomo, ocupa con rapidez el lugar de uno de sus electrones, desplazándolo de su órbita y pasando a actuar como un electrón pesado. Al tener una masa mucho mayor que la del electrón, la interacción con el núcleo del átomo es diferente: para empezar, el antiprotón desciende de capa electrónica hasta ocupar un lugar en el orbital de menor energía, desde donde la atracción de protones y antiprotones provoca que estos últimos caigan en trayectoria espiral hacía el núcleo, hasta que la atracción nuclear fuerte entre partícula y antipartícula hace que se produzca su colisión, con la consiguiente aniquilación (fig. 5).

La aniquilación entre cada tipo de antipartícula tiene resultados diferentes, y en el caso del protón y antiprotón entran más elementos en juego que la pura radiación, al contrario que en el caso de la aniquilación electrón-positrón, que da lugar a dos rayos gamma. En la desintegración protónica se producen, por un lado, cinco piones, dos de los cuales son eléctricamente neutros y tienen una vida tan corta que prácticamente de inmediato se desintegran en dos rayos gamma y, por otro lado, tres piones cargados, que tienen una vida media de nanosegundos y se desintegran en muones y neutrinos. Los neutrinos raramente interactúan con la materia: se calcula que en setenta años, de los miles de millones de neutrinos que atraviesan el cuerpo de una persona cada segundo, solo una media de cuatro interactúan con la materia que lo forma. Los muones, en cambio, tienen una vida de microsegundos y se desintegran en electrones y positrones, que al aniquilarse dan lugar a rayos gamma. Así, aunque el producto final de la aniquilación vuelva a ser rayos gamma, hay una serie de pasos intermedios en los que se crean varias partículas.

La gran ventaja de irradiar con antiprotones, en lugar de hacerlo con protones, es que las partículas generadas en las etapas intermedias pueden hacer explotar la célula cancerígena diana y parte de las demás células malignas de alrededor. Los resultados de los

Fig. 5



La aproximación de un antiprotón hacia un átomo de materia (arriba) termina con una trayectoria espiral hasta el núcleo. La aniquilación subsiguiente (abajo) deja una fuerte emisión de rayos gamma y algunas partículas residuales.

ensayos de esta técnica demostraron que se necesita cuatro veces menos antiprotones que protones para causar el mismo impacto, lo que implicaría una disminución significativa del daño causado en el tejido sano que rodea al tumor.

Es necesario realizar más estudios sobre la radioterapia con antiprotones antes que pueda convertirse en una práctica terapéutica aplicable. La posibilidad de desarrollar un método para luchar contra el cáncer como este, más efectivo y menos dañino, es uno de los ejemplos perfectos de la necesidad de seguir investigando en física

de partículas y de cómo los avances en ciencia avanzada pueden ayudar a mejorar la calidad de vida de muchas personas.

COMBUSTIBLE PARA VIAJES INTERESTELARES

De la investigación sobre antimateria se espera que en un futuro mejore las condiciones de los viajes espaciales. Conseguir crear cohetes cuyo motor obtenga la energía de la aniquilación entre materia y antimateria no solo haría posibles misiones que con la tecnología actual son impensables, sino que también mejoraría, tanto en tiempo como en comodidad, las misiones espaciales que ya se llevan a cabo. Este tipo de impulso permitiría, por ejemplo, llegar a la Luna en pocas horas, a Marte en pocos días y a Plutón en pocas semanas, en lugar de tardar días, meses y años, respectivamente. Así, podríamos aprovechar los recursos de otros planetas, abastecer colonias y, poco a poco, empezar a conquistar el sistema solar. Esto sería uno de los puntos de inflexión más importantes de la historia de la humanidad.

La colonización de otros planetas no depende únicamente de conseguir propulsión producida por antimateria, pero esta la facilitaría en gran medida. El proyecto Mars One tiene por objetivo crear un asentamiento humano permanente en Marte. En una primera fase, de inicio previsto para finales de 2018, se pondrían tanto en órbita terrestre como marciana una serie de satélites de comunicaciones, como apoyo para la primera misión tripulada, que despegaría en 2022, llegando al planeta rojo en 2023. Tras esta misión, se mandarían equipos de cuatro astronautas cada dos años.

La distancia entre la Tierra y Marte, cuando los dos planetas se encuentran en las posiciones más cercanas entre ellos, es de más de 70 millones de kilómetros, de modo que lo que con los métodos de propulsión actuales implicaría un viaje de entre seis y siete meses, con el uso de la propulsión por antimateria se convertiría en un viaje

de unos pocos días. Además, los vuelos de naves de Mars One precisarán grandes volúmenes de combustible, lo que implicará una gran masa total y, en consecuencia, una gran potencia impulsora en el momento del despegue. Esto supone uno de los problemas más importantes del proyecto, que se solucionaría con facilidad usando antimateria, ya que el peso necesario para producir la misma energía sería insignificante. Por otro lado, los meses de duración del vuelo de una misión convencional implicaría que los astronautas estarían sometidos durante mucho tiempo a la radiación solar, que en el espacio exterior es mucho más fuerte que en la superficie de la Tierra, al no estar protegida la nave por el filtro de una atmósfera planetaria. En cambio, los relativamente breves viajes impulsados por la aniquilación materia-antimateria, reducirían este riesgo para la tripulación. Finalmente, con un combustible de antimateria, los astronautas no se verían forzados a renunciar a toda una vida en la Tierra, sino que podrían participar en más de una misión de ida y vuelta sin dificultades.

> El problema con los cohetes convencionales es que, si llevas combustible, necesitas combustible solo para mover todo el combustible que llevas.
>
> GEOFFREY LANDIS

La primera persona de la que se tiene constancia que estudió la posibilidad de crear un cohete con combustible de antimateria fue el ingeniero austríaco Eugene Sänger, hacia 1950. En aquella época la única antipartícula que se conocía era el positrón, que al aniquilarse con un electrón da como resultado rayos gamma, es decir, fotones de alta energía, por lo que se refirió a las hipotéticas astronaves como «cohetes fotónicos». En la aniquilación electrón-positrón, las partículas gamma salen disparadas en cualquier dirección, es decir, no están focalizadas, lo que dificulta enormemente aprovechar su energía. Sänger dedicó gran parte de sus estudios a desarrollar una manera de controlar su dirección mediante

espejos, pero los rayos gamma son mucho más energéticos que los fotones de la luz visible y no se comportan igual: mientras los rayos de luz visible son reflejados por un espejo, los gamma pueden penetrar profundamente en el material y atravesarlo. Sänger murió sin haber encontrado una solución a este reto.

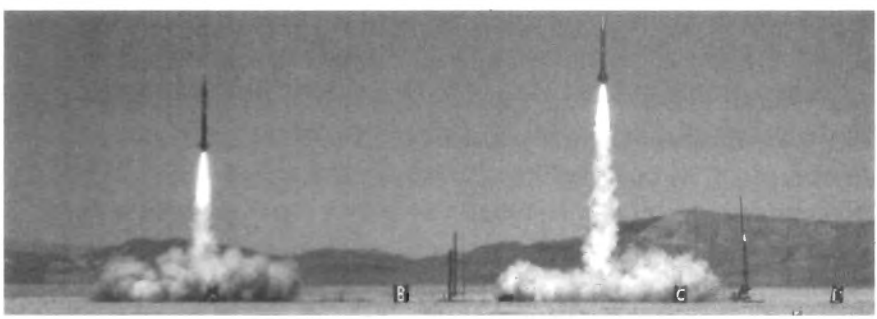
El descubrimiento experimental del antiprotón en 1955 cambió las cosas. A medida que se aprendía cómo es su proceso de aniquilación con el protón, la idea de un cohete de antimateria cambió de la de un cohete fotónico a la de un cohete de piones, unas partículas producidas en este proceso. Desde entonces se han ideado varias formas de aprovechar este hipotético combustible. Una de las técnicas consiste en hacer pasar las partículas resultantes a través de un fluido, convirtiendo parte de su energía cinética en energía calorífica que calentaría y expandiría el gas, que saldría expulsado a presión del cohete, provocando la reacción correspondiente.

Los piones se desintegran con gran rapidez y su vida se mide en nanosegundos, por lo que puede parecer sorprendente que tengan tiempo suficiente de calentar una gran masa de materia. Juega a su favor el hecho de que se mueven a velocidades relativistas, alrededor del 94% de la velocidad de la luz, por lo que, como afirma la relatividad especial, el tiempo para ellos pasa más despacio y les da tiempo a llegar a una distancia de hasta 21 m. Por otro lado, los muones resultantes de la desintegración del pion viven algunos microsegundos, tiempo que también aumenta considerablemente gracias a su alta velocidad, y pueden llegar a viajar casi dos kilómetros.

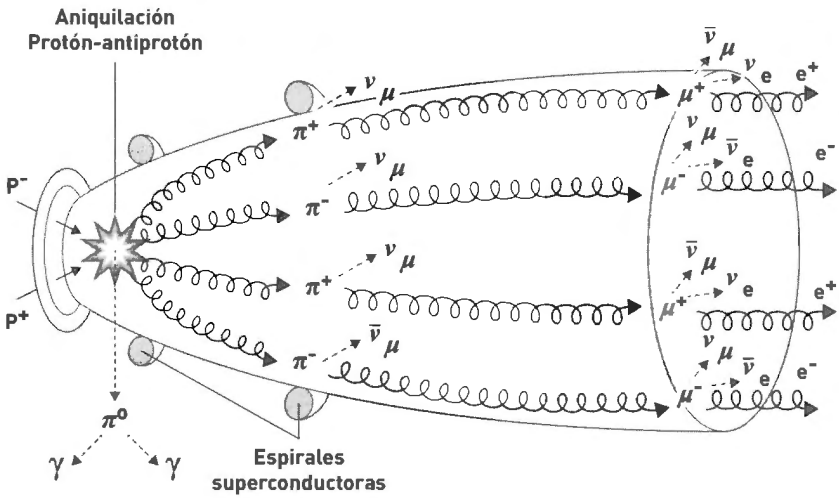
Si se suman los 21 m de los piones y los 2 km de los muones, la distancia total recorrida es mucho mayor que el tamaño de un cohete. Sin embargo, se puede controlar la trayectoria de las partículas mediante un fuerte campo magnético, obligándolas a viajar en espiral (fig. 6). De esta forma, se podría conseguir que los piones y muones recorrieran dentro del motor la totalidad de su trayecto, dando tiempo suficiente para calentar los gases. Con las técnicas de ingeniería adecuadas, también se podría conseguir que el cohete

> IMPULSARSE EN EL VACÍO

La imagen del despegue de un cohete está asociada inevitablemente a la violenta expansión de los gases propulsores que se producen tras la ignición, que impulsan a la nave hacia las alturas. Un observador ingenuo puede creer que el cohete despega gracias al empuje de los gases contra la superficie terrestre, formando una columna en la que se encaramaría. Un simple análisis echa por tierra esta hipótesis: de ser así, cuando el cohete llegara a una altura en la que quedara rodeado solo por la atmósfera ya no tendrían un suelo al que empujar; todavía más: una vez en el vacío de nada servirían los gases desprendidos por la nave. La verdadera razón por la que despegan los cohetes es por el empuje producido por la tercera ley de Newton, o ley de acción y reacción, que postula que todas las fuerzas vienen en pares, es decir, que cada acción tiene una reacción igual en intensidad y ejercida en sentido opuesto. Así, cuando un cohete expulsa los gases de combustión, la misma fuerza con la que los evacúa se aplica al cohete en sentido contrario, y esto es lo que hace que se despegue. Este mismo principio se aplica en el vacío espacial, sin que las condiciones exteriores lo afecten. Podemos experimentar los efectos del impulso por reacción abriendo al máximo el caudal de agua de una ducha de teléfono, notando cómo el agua expulsada produce una fuerza que hemos de compensar sujetando con firmeza el mango.



— Lanzamiento simultáneo de dos cohetes experimentales, impulsados por la fuerza de reacción contraria a la expansión de los gases de combustión.



Para aprovechar al máximo la aniquilación protón-antiprotón, las trayectorias de las partículas que se generan se deben retorcer en el interior del análogo de una cámara de combustión convencional.

fuera propulsado por las propias partículas productos de la aniquilación sin necesidad de calentar ninguna sustancia intermediaria.

Otro motor de propulsión basado en la aniquilación entre materia y antimateria es el llamado *motor de Augenstein*, diseñado por el matemático y físico alemán Bruno Wilhelm Augenstein. En este caso, la aniquilación de protones y antiprotones se produce en un hueco en el centro de un bloque de tungsteno poroso. La densidad de este metal es tan alta (un 71% mayor que la del plomo) que provoca que no solo las partículas subatómicas procedentes de la aniquilación, sino también los rayos gamma pueden calentarlo. Ese calor viaja a través del bloque hasta alcanzar y calentar el combustible que está a su alrededor, que también se calienta y puede actuar como medio propulsor. Un motor con tales características no

solo sería una buena opción para viajes espaciales, sino que incluso se podría utilizar en la Tierra.

Físicamente, el funcionamiento de los motores con combustible de antimateria es posible y fundamentado en una teoría sencilla. Por otro lado, también sería económicamente rentable ya que, por muy caro que sea crear antiprotones, sería necesaria la producción de muy poca cantidad. Si se siguen mandando satélites y sondas al espacio exterior cuyo combustible no tiene ni una sola antipartícula, se debe a la dificultad de almacenar los antiprotones: los escasos minutos que se consiguen almacenar en las instalaciones del CERN pueden ser suficientes para su estudio, pero no para llevar naves espaciales muy lejos de la Tierra. Este es el reto que afrontan científicos e ingenieros, ya preparados para que cuando finalmente se solucione, la antimateria se convierta en el combustible que nos proporcione la llave del espacio.

LAS PROMESAS DE LA ANTIMATERIA

La antimateria tendrá, con toda seguridad, un papel de primer orden en el avance científico y tecnológico, que siempre se ha visto estimulado por los retos. Para calibrar hasta qué punto esto es cierto, basta con recordar que la fórmula de Dirac, a partir de la cual se dedujo la existencia de antimateria, data de 1928: así pues, en menos de cien años se ha pasado de desconocerla por completo a desarrollar sus primeras aplicaciones prácticas y a postularla como la llave de acceso a la expansión de la humanidad más allá de nuestro planeta y quizá de nuestro sistema solar.

La posibilidad de los viajes estelares no es la única promesa del dominio de la antimateria, aunque puede que sea la más espectacular. Como en cada una de las revoluciones tecnológicas de la historia de la humanidad, las transformaciones que comportarán los nuevos logros solo se desvelarán a medida que la inventiva del ser

humano convierta en realidad proyectos hoy difícilmente imaginables. Cada invento y cada aplicación que se desarrolle, actuará como un estímulo que acelerará la aparición de otras novedades.

Por otra parte, una sociedad futura en la que se utilice la antimateria como fuente de energía deberá desarrollar unos protocolos de seguridad del máximo rigor, ya que su manipulación no admitirá el más mínimo fallo. Más allá de esto, la responsabilidad deberá ser un valor prioritario y ya no se podrá consentir el empleo de esta nueva tecnología sin tener en cuenta sus consecuencias: es posible que en el futuro se logre utilizar la fuente de energía más poderosa del universo, pero está muy claro que no se podrá jugar con ella.

LECTURAS RECOMENDADAS

Chardin, Gabriel, *La antimateria: una explicación para comprender. Un ensayo para reflexionar*, Ciudad de México, Siglo XXI Editores, 2001.

deGrasse Tyson, Neil y Goldsmith, Donald W., *Orígenes: catorce mil millones de años de evolución cósmica*, Barcelona, Planeta, 2014.

Forward, Robert L. y Davis, Joel, *Explorando el mundo de la antimateria: su poder energético y el futuro de los viajes interplanetarios*, Barcelona, Gedisa, 1999.

Hawking, Stephen, *El gran diseño*, Barcelona, Crítica, 2010.

Kaku, Michio, *Física de lo imposible: ¿podremos ser invisibles, viajar en el tiempo y teletransportarnos?*, Madrid, Debate, 2010.

Krauss, Lawrence Maxwell, *Historia de un átomo: una odisea desde el Big Bang hasta la vida en la Tierra... y más allá*, Pamplona, Laetoli, 2005.

Lleó, Atanasio, *El Big Bang y la Desaparición de la Antimateria: El Universo Pudo Ser Muy Distinto*, Madrid, Editorial Académica Española, 2012.

Oerter, Robert, *La teoría de casi todo: triunfo no reconocido de la física moderna*, Ciudad de México, Fondo de Cultura Económica, 2008.

ÍNDICE

acelerador de partículas 9, 35-36, 114
agujero negro 92, 95, 96
Anderson, Carl David 8, 40, 58-59, 67, 68
antihelio 104-105
asimetría 43, 77, 79, 83-84, 104, 121
Augenstein, Bruno Wilhelm 134
motor de 134

bariogénesis 84
barión 69, 72-73, 84, 111, 121
Bevatrón 36, 38
Big Bang 9, 34, 42-43, 76-77, 80-82, 86-89, 96, 100, 104
bosón 41, 49, 70, 75-76, 86
Bohr, Niels 52-54
Boyle, Robert 48
Brookhaven 120

carga eléctrica 8, 16, 18, 22-24, 50, 65, 70, 90, 96, 99, 112, 116
CERN 10, 29, 38-39, 41, 75, 83, 115, 119, 126, 135
Chamberlain, Owen 36, 38
Cherenkov, radiación 36
ciclotrón 113, 125
cohete 11, 30, 32, 130-133
combustible 7, 29-32, 130-132, 134-135

Dalton, John 48, 54
Dehmelt, Hans Georg 115
desintegración 33-34, 40, 59, 84, 86, 124-125, 127-128, 132

Dirac, Paul 8, 13, 35-38, 56, 58, 61
ecuación de 9, 56, 58, 63, 135
mar de 58, 60

Einstein, Albert 25, 87-88
ecuación 26-27, 102
eléctricos, campos 114-115
espectro 52, 54, 118
espín 49, 55, 57, 68-70, 75, 99
estado fundamental 21-22
extrañeza 70, 72

Fermilab 29, 38
fermión 70
Feynman, Richard 60-61, 63, 102-103
diagramas de 61-63
fotón 23, 28, 49, 61-62, 70, 82-83, 88, 100, 112, 118, 124, 131-132
fuerza
de gravedad 10, 76
electromagnética 76
nuclear débil 70, 103-104
nuclear fuerte 20, 68, 70, 90
fuerzas fundamentales 10, 83, 86

galaxia 9, 40, 42, 47, 79, 81-82, 87, 90, 92-96, 104-105
Gamow, George 88-89
Gell-Mann, Murray 49, 70-73
gravitón 10, 75-76

hadrón 41, 85
Hawking, Stephen 37, 95-97, 110
radiación de 96
helio antiprotónico 119-120

isospín 68, 70, 72-73
isótopo 33, 124-125, 127

kelvin 90

leptón 49, 69, 74, 111
Lockyer, Norman 48

Marte 11, 130
magnético
campo 22, 57, 59, 103, 113-114, 116-117, 120, 123, 132
momento 18, 22-23, 57, 74, 99
mecánica cuántica 22, 36, 37, 54, 56, 60-61, 63, 76, 97
modelo
atómico 50-51, 54-55, 65
estándar 10, 34, 48-49, 64, 71, 76, 84, 106, 121
muon 49, 68-69

Nagaoka, Hantaro 50
neutrino 49, 74, 90-91, 99, 124, 128
Newton, leyes 55, 133
nucleón 20, 68-69, 91

orbital 20-22, 118, 128

paridad 102-104
partículas
fundamentales 73-74, 76
subatómicas 9-10, 17-18, 26, 45, 49, 56, 59, 63-64, 71, 74, 84, 111, 134
PET 29, 33, 121, 125
pion 66-69, 70, 74, 112, 121, 128, 132
positronio 40
Prout, William 48

quark 49, 71, 73-74, 84-85, 111, 121

rayos gamma 28, 33, 40, 91, 124, 128-129, 131-132, 134
relatividad 26, 31, 56, 62-63, 97, 132
Rutherford, Ernest 50-55, 64

Segrè, Emilio 36, 38
semivida 127
simetría 10, 36, 42, 62, 84-86, 103-105, 120, 122
CP 104, 121
CPT 104
sincrotrón 113
sistema solar 11, 30-31, 43, 94, 130, 135
Stern-Gerlach, experimento 57

tabla periódica 18-19, 89
teoría de gran unificación 84
trampa de Cusp 120, 122
trampa de Penning 115-116, 120
Thomson, Joseph John 50-51, 53-54

Wheeler, John Archibald 60